



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

Sampo Rahko

YMPÄRISTÖTEKNIikka

Laserkeilaukseen perustuvan latvuspeittävyuden vaikutus lumen latvusinterseptioon ja vesiarvoon

Diplomityö

Joulukuu 2021

TIIVISTELMÄ

Laserkeilaukseen perustuvan latvuspeittävyuden vaikutus lumen latvusinterseptioon ja vesiarvoon

Sampo Rahko

Oulun yliopisto, Ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma

Diplomityö 2021, 68 + 5 s.

Työn ohjaajat: Pertti Ala-Aho & Hannu Marttila

Lumi on merkittävässä osassa hydrologiaan ja ilmastoon liittyvissä prosesseissa. Muuttuvan ilmaston myötä on entistä tärkeämpää tunnistaa lumen käyttäytymistä ja ominaisuuksia, jotta voidaan laatia entistä tarkempia hydrologiaan sekä ilmastoon liittyviä ennusteita.

Lumen syvyyttä ja vesiarvoa on mitattu Suomessa lumilinjojen avulla 1940-luvulta saakka. 1990-luvun lopulla on suoritettu Suomen ensimmäiset laserkeilaukset pääasiassa korkeusmallin tuottamiseen ja metsäsovelluksiin. Laserkeilaus tuottaa ns. pistepilven, joka kuvaa kolmiulotteisesti maanpinnan muotoja ja sen päällä olevia kohteita kuten puustoa. Tämän työn tarkoituksena oli laskea lumilinjojen alueelle laserkeilaukseen perustuva puuston latvuspeittävyuden arvo. Lumilinjojen lumimittauspisteille laskettua latvuspeittävyuden arvoa hyödynnettiin tutkittaessa puuston latvuspeittävyuden vaikutusta latvuspätykseen eli latvusinterseptioon kuusi-, mänty- ja lehtivaltaisissa metsissä. Lisäksi tutkittiin, onko latvuspeittävyydellä vaikutusta lumen vesiarvoon eli lumikuormaan. Tutkimuksessa oli mukana yhdeksän lumilinjaa, joista eteläisin lumilinja sijaitsi Multialla ja pohjoisin lumilinja sijaitsi Kittilän Puljussa.

Laserkeilauksen tuottaman pistepilven avulla määritettiin lumilinjojen alueelle puuston latvuspeittävyuden arvo. Latvuspeittävyuden arvo määritettiin kaikkien yli 2 metrin korkeudella olevien laserpisteiden osuutena yleisesti Suomen metsien inventoinnissa käytetyssä hilaruudukossa $16\text{ m} \times 16\text{ m}$. Tämä suhdeluku muodosti jokaiselle

hilaruutuyksikölle oman latvuspeittävyiden arvon. Latvuspäätys sekä lumen vesiärvö määritettiin laserkeilauksen ajankohdan lähelle osuvien talvien maksimilumitilanteen mukaan vertaamalla avoimen alueen lumen määrää suhteessa puuston peittävien alueiden lumimääriin.

Tutkimuksen tuloksista voidaan todeta, että puuston latvuspeittävyiden kasvaessa kasvaa myös puuston latvusinterseptio eli latvuspäätys, ja latvuspäätys on aavistuksen voimakkaampaa eteläisessä Suomessa verrattuna pohjoiseen Suomeen. Latvuspäätys on voimakkainta kuusivaltaisissa metsissä ja toiseksi voimakkainta mäntyvaltaisissa metsissä. Vähäisintä latvuspäätys on lehtipuuvaltaisissa metsissä. Lumen vesiärvö maanpinnalla vähenee oletetusti latvuspeittävyiden kasvaessa.

Tutkimuksen tulosten myötä voidaan todeta puuston latvuspeittävyiden ja metsätyyppin vaikuttavan puuston kykyyn siepata lunta. Kuusivaltaisen metsän sieppauskyky on huomattavasti suurempi kuin mäntyvaltaisen metsän ja mäntyvaltaisen metsän suurempi kuin lehtipuuvaltaisen metsän. Puuston latvuspeittävydellä, latvuspäätöksellä sekä metsätyyppillä on suuri vaikutus lumen jakaumaan ja siten veden hydrologiseen kiertoon. Lumi on tärkeä osa hydrologiaa ja tutkimuksen tulosten myötä suositan ottamaan huomioon puuston latvuspeittävyiden, latvuspäätöksen ja metsätyyppin kaltaiset tiedot esimerkiksi tulvamallinnuksissa. Tutkimus toimii hyvänä pohjana laajemmille tutkimuksille isommalla otannalla. Laajemman otannan lisäksi tulevissa tutkimuksissa voitaisiin hyödyntää kattavammin laserkeilausaineistojen tarjoamaa dataa luomalla tarkemmat mallit latvustosta (mm. korkeus ja latvuspeittävyys) ja tutkimalla näiden ominaisuuksien vaikutusta yhdessä ja erikseen puuston kykyyn siepata lunta.

Asiasanat: Laserkeilaus, interseptio, latvuspeitto, lumi, vesiärvö

ABSTRACT

The forest canopy cover determined by laser scanning and its affect on interception and snow water equivalent

Sampo Rahko

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Master's thesis 2021, 68 + 5 pp.

Supervisors at the university: Pertti Ala-Aho & Hannu Marttila

Snow has a significant role in processes related to hydrology and climate. Because the climate is changing, it is even more important to identify snow's behaviour and qualities in order to make more accurate forecasts regarding hydrology and climate.

The depth and water equivalent of snow have been measured in Finland using snow lines since the 1940s, and the first airborne laser scannings were performed in the 1990s for production of surface model. Laser scanning produces a so called point cloud, which three dimensionally represents topography and objects above ground, i.e. forests. The purpose of this thesis was to calculate forest canopy cover in the snow line areas based on laser scanning data. The forest canopy cover calculated for the measuring points in the snow lines was used when studying the affect of canopy cover to interception in spruce, pine and deciduous forests. The aim was also study whether canopy cover affects snow water equivalent. Nine snow lines were included in this study, from which the southernmost is located in Multia and the northernmost in Pulju, Kittilä.

Laser scanning point cloud was used to determine the forest canopy cover for the snow line areas. Only laser points 2 meters above ground in the 16 m * 16 m grid square were included when calculating the canopy cover. This ratio constructed individual canopy cover for every grid square. In addition to laser scanning date, four winters in total were taken into account when determining forest canopy cover and snow water equivalent. This was done by comparing snow depth in open areas with forest areas.

These results show that interception increases with forest canopy cover. Also interception is slightly greater in Southern Finland than in Northern Finland. Interception values are highest in spruce forests, and lowest in deciduous forests. Snow water equivalent in the ground decreases when forest canopy cover increases.

This study demonstrates that forest canopy cover and forest type affect the interception. Interception values are much higher in spruce forests than in deciduous forests. The forest canopy cover, interception and forest type have a significant impact on snow distribution and hydrology. Since snow is an important part of hydrology and based on the results of this thesis, forest canopy cover, interception and forest type should be taken into account i.e. in flood models. This study creates a good basis for future studies with larger sampling. The laser scanning data could be used more widely to create more accurate canopy models and explore how these qualities affect interception.

Keywords: Laser scanning, interception, canopy cover, snow, snow water equivalent

ALKUSANAT

Diplomityön tarkoituksena oli tutkia puuston latvuspeittävyuden vaikutusta puuston latvuspidätykseen ja vesiarvoon kuusivaltaisessa, mäntyvaltaisessa ja lehtipuuvaltaisessa metsässä. Tutkimuksessa hyödynnetyt lumilinjamittaukset perustuivat Suomen ympäristökeskuksen (SYKE) hallinnoimiin mittauksiin joita on suoritettu 1940-luvulta lähtien. Tutkimuksen rahoitti Maa- ja vesiteknikan tuki ry:n (MVTT) tukema hanke ”Hydrologisten arkistojen unohdetut aarteet”. Tutkimuksessa käytetyt lumilinjat digitoitiin SYKE:ssa osana hanketta. Tutkimuksessa laskettiin lumilinjalle latvuspeittävyuden arvot perustuen laserkeilaukseen. Laserkeilausaineisto on kokonaisuudessaan Maanmittauslaitoksen (MML) tuottamaa avointa dataa.

Diplomityö on toteutettu kesäkuun 2020 ja joulukuun 2021 välisenä aikana. Kiitän työn ohjaajia Pertti Ala-Ahoa ja Hannu Marttilaa diplomityön mahdollistamisesta, hyvästä ohjauksesta ja kärsivällisyydestä pitkäksi venyneessä projektissa.

Oulussa, 12.12.2021 Sampo Rahko

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO	8
2 KIRJALLISUUSKATSAUS	10
2.1 Laserkeilaus	10
2.1.1 Yleistä laserkeilauksesta	10
2.1.2 Lentolaserkeilaus	10
2.1.3 Lentolaserkeilauksen hyödynnettävyys ympäristötutkimuksissa	13
2.2 Lumi	14
2.2.1 Ilmastomuutos ja lumen merkitys ympäristölle sekä ihmistoiminnalle	14
2.2.2 Lumen ominaisuudet	17
2.2.3 Lumen ominaisuuksien mittaus	20
2.2.4 Lumen kaukokartoitusmenetelmät	21
3 MENETELMÄ	24
3.1 Tutkimuksen kuvaus	24
3.2 Latvuspeittävyyden määrittäminen	25
3.3 Latvusinterseption ja vesiarvon määrittäminen	29
3.4 Tilastollinen testaus	30
4 TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU	32
4.1 Latvuspeittävyys	32
4.2 Latvuspeittävyyden vaikutus latvusinterseption	35
4.3 Latvuspeittävyyden vaikutus lumen vesiarvoon	42
5 JOHTOPÄÄTÖKSET	46
6 YHTEENVETO	49
LÄHTEET	51
LIITTEET	69

1 JOHDANTO

Lämpötila, sadanta, tuuli, pilvet ja lumipeite ovat tärkeitä ilmastosuureita, jotka vaikuttavat suuresti elinympäristöön. Suomessa pitkien aikasarjojen (1847 – 2013) tutkimuksissa on havaittu keskilämpötilan nousseen n. 2 astetta ja keskilämpötilan nousun selkeä ja jatkuva kiihtyminen on tapahtunut 1960-luvulta alkaen. Erityisesti keskilämpötilan nousun on havaittu tapahtuvan talvella (Mikkonen ym. 2015, s. 1521). Jatkuva keskilämpötilan nousu tarkoittaa ilmaston lämpenemistä ja tällä on vaikutusta elinympäristöömme. Ilmaston lämpenemisen seurauksena mm. merivedenpinta on kohonnut ja merivesi lämmennyt, kasvihuonekaasujen pitoisuudet ovat kasvaneet ilmakehässä sekä lumen ja jään määrä ovat vähentyneet (Ruostenoja 2014 s. 4). Ilmastomuutoksen myötä talvikausi on lyhentynyt koko Suomessa aiheuttaen lumentulon myöhästymisen ja lumen sulamisen aiemmin. Lumella on tärkeä osa hydrologisissa ja ilmastoon liittyvissä prosesseissa (Sicart ym. 2004 s. 774) lumen toimiessa esimerkiksi vesivarantona.

Lumi on tärkeä osa hydrologian prosesseja ja saa osansa ilmastomuutoksesta. Näin ollen on hyvä tunnistaa kuinka erilaiset metsätyypit (mäntyvaltainen metsä, kuusivaltainen metsä, lehtipuuvaltainen metsä) sieppaavat lunta ja miten kunkin metsätyypin latvuspeittävyys vaikuttaa latvuksen kykyyn siepata lunta. Latvusinterseptiolla eli latvuspädytyksellä kuvataan kasvillisuuden kuten puiden latvusten kykyä siepata satavaa lunta latvustoihinsa. Latvuspeittävyydellä (canopy cover) toisin sanoen latvuspeitolla, taas tarkoitetaan prosenttiosuutta latvuksen peittämästä pystysuorasta alueesta suhteessa maan pinta-alaan (Korhonen 2006, s. 2). Suomessa latvuspeitto on määritetty perinteisesti 1910-luvulla Werner Cajanuksen kehittämän Cajanuksen putken avulla tai densiometrillä (spherical densiometer). Lisäksi latvuspeittoa on määritetty kameroiden ja latvusrelaskoopin avulla. Valtakunnallinen metsien inventointi (VMI) on suoritettu aikoinaan silmävaraisesti. Ilma- ja satelliittikuvia on myös käytetty tutkittaessa latvuspeittävyttä ja uusimpana menetelmänä on käytetty laserkeilauksesta johdettua tietoa (Korhonen 2011a, s. 278-279).

Suomen ensimmäiset avoimesti saatavilla olevat laserkeilausaineistot ovat vuodelta 2008 ja tämän jälkeen on perustettu kansallinen laserkeilaus- ja ilmakeilausohjelma. Kansallisen laserkeilausohjelman myötä koko Suomi on kattavasti laserkeilattu ja tämä

mahdollistaa uusia menetelmiä esim. lumitutkimuksiin. Suomessa on kattava lumilinjojen verkosto, joka on saanut alkunsa 1940-luvulla. Nykyään lumilinja-aineiston vastaa Suomen ympäristökeskus. Kattava lumilinjojen verkosto ja pitkät aikasarjat mahdollistavat laajat lumitutkimukset. Kattavan lumilinja-aineiston ja kesällä suoritettua laserkeilauksen yhdistelmää ei ole tiettävästi hyödynnetty aiemmin tutkimuksissa. Tutkimuksen tavoitteena on määrittää lumilinjojen alueella puuston latvuspeittävyyden arvot hilaruutuksittain. Lumilinjojen mittaushavainnoista määritetään metsätyypeittäin (kuusivaltainen metsä, mäntyvaltainen metsä, lehtipuuvaltainen metsä) latvusinterseptio eli latvuspäätys sekä lumen vesiarvo, ja näitä havaintoja verrataan puuston latvuspeittävyyteen.

2 KIRJALLISUUSKATSAUS

2.1 Laserkeilaus

2.1.1 Yleistä laserkeilauksesta

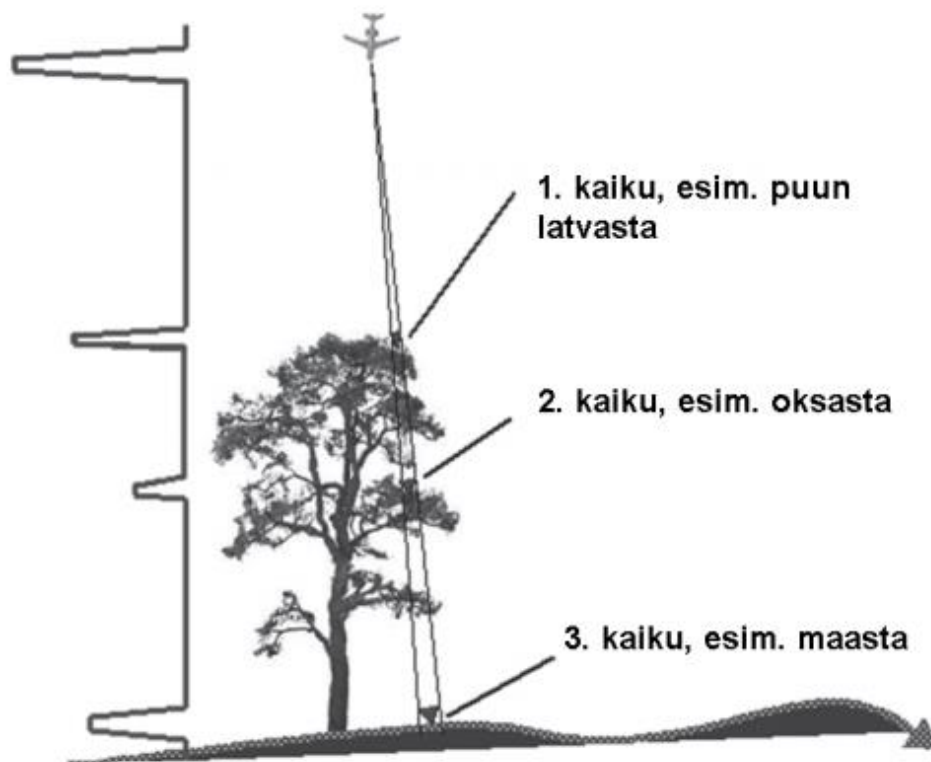
Laserkeilaus (LiDAR, Light Detection and Ranging) eli lasertutka käsitettä käytetään usein rinnan lentolaserkeilauksen (ALS, Airborne Laser Scanning) kanssa. Laserkeilaustekniikat voidaan jakaa karkeasti lentolaserkeilaukseen, maastolaserkeilaukseen tai maalaserkeilaukseen (TLS, Terrestrial Laser Scanning) sekä liikkuvaan maastolaserkeilaukseen (MLS, Mobile Laser Scanning). Laserkeilaustekniikoiden toimintaperiaate on hyvin samanlainen ja käytännössä ero syntyy erilaisesta kiinnitysalustasta, joita ovat lentokone, kolmijalka, ajoneuvo tai miehittämätön ilma-alus (Holopainen ym. 2013 s. 11, 30).

Laserkeilaimet jaetaan etäisyysmittausperiaatteen perusteella pulssilaserkeilaimiin tai vaihe-erokeilaimiin. Pulssilaserkeilaimen tekniikka perustuu laserpulssin kulkuajan mittaukseen, jolloin laserkeilain lähettää laserpulssin kohteeseen ja pulssi heijastuu kohteesta takaisin; näin saadaan selville laserpulssin kulkuaika ja kohteen etäisyys. Vaihe-erokeilauksen tekniikka perustuu jatkuvaan lasersäteen lähetykseen, jolloin kohteen etäisyys selviää lähtevän ja palaavan lasersäteiden vaihe-erosta (Holopainen ym. 2013 s. 30). Pulssilaserkeilaimet soveltuvat laajojen alueiden mittauksiin, joissa mitattavien kohteiden etäisyys voi olla jopa kilometrejä. Pulssilaserkeilaimen dataa on käytetty ja käytetään mm. vesistötutkimuksissa (Syke 2020), metsän rakenteen tutkimuksissa (Siipilehto ym. 2016) ja laserkeilauksesta muodostettua korkeusmallia esim. arkeologisen kulttuuriperinnön tietojen täydentämisessä (Koivisto ja Laulumaa 2012; Rikkinen ja Sillanpää 2019). Vaihe-erokeilaimilla mittausetäisyys on maksimissaan 100 m ja tätä dataa on käytetty mm. apuvälineenä infra- ja rakennushankkeiden suunnittelussa sekä tiedon tallioinnissa (Heikkilä 2008; Teitto 2017; Poutanen 2017).

2.1.2 Lentolaserkeilaus

Laserkeilauksen menetelmät kehittyivät 1990-luvulla ja kehityksen mahdollistivat lentokoneinertiajärjestelmien eli IMU (Inertial Measurement Unit), GNSS-järjestelmien

(Global Navigation System Satellite), keilaustaajuuden sekä lasertekniikan kehittyminen (Hyyppä ym. 2008 s. 1340). Lentolaserkeilauksessa käytetään pulssilaserkeilaimia, joissa etäisyyden mittausta perustuu laserpulssin kulku-aikaan. Laserkeilain lähettää laserpulssin kohtisuoraan lentosuuntaa vastaan ja esimerkiksi ensimmäinen kaiku tulee puuston latvustosta ja viimeinen kaiku palautuu maanpinnasta sinne osuessaan. Kuvassa 1 on havainnollistettu laserpulssin etenemisen tapahtumaketjua puustossa. Kun laserkeilaimen sijainti ja asento tiedetään tarkasti IMU-järjestelmän ja GNSS-mittauksen perusteella, laserpulssin kulkuajan perusteella mitattu etäisyys voidaan muuntaa korkeudeksi ja saadaan selville koordinaatit X, Y, Z. Koordinaateista muodostuu maaston tai kohteen sijainti- ja korkeuspistetiedosto eli pistepilvi. Pistepilven jokainen piste sisältää sijaintitiedon lisäksi mittausajan, intensiteetin, pulssin järjestysnumeron ja useasti aaltomuototiedot (Holopainen ym. 2013 s. 11-21). Pulssin järjestysnumerojen, ensimmäinen (first), keskimäinen (intermediate), viimeinen (last echoes), avulla pistepilven käsittely helpottuu. Ensimmäiset kaiut osuvat latvustoon, keskimäiset latvuston ja maanpinnan väliin, ja viimeiset kaiut todennäköisesti maanpintaan. Viimeisten kaikujen avulla voidaan luoda maanpintamalli, josta voidaan johtaa ensimmäisten ja keskimäisten kaikujen korkeusero maanpintaan (Yrttimä ja Riihimäki 2018).



Kuva 1. Laserpulssin kaikhavaintojen muodostuminen. (Holopainen ym. 2013)

Laserkeilauksen pistetiheys kertoo aineiston hyödynnettävyydestä. Tiheämpi laserkeilausaineisto (pulssien määrä / m²) antaa enemmän mahdollisuuksia aineiston jatkokäytölle kuin harvempi pulssinen aineisto. Toisaalta tiheämpi aineisto edellyttää isompaa tallennuskapasiteettia. Pistetiheyteen vaikuttavat pulssien määrän lisäksi lentokorkeus ja lentonopeus, keilauskulma ja lentolinjojen sivupeittoprosentti sekä maaston tiheys ja topologia. Keilauskulman ja lentokorkeuden säätö on eräänlainen kompromissi. Puustoisilla alueilla keilauskulman tulisi olla mahdollisimman kapea, jotta puusto ei peitä näkymää maanpintaan. Toisaalta kapea keilauskulma nostaa lentokorkeutta, jotta lentolinjojen sivupeittoprosentti pysyy riittävänä. Maanpinnan pisteiden tarkkuus taas heikkenee lentokorkeuden noston myötä (Holopainen ym. 2013 s. 21). Maanmittauslaitoksen laserkeilausaineistoissa vuosien 2008 - 2019 pistetiheys on vähintään 0,5 pistettä / m², kun vuodesta 2020 on käytetty pistetiheyttä 5 pistettä / m² (Maanmittauslaitos 2021).

Suomessa laserkeilaukset suoritetaan keilausaikaikkunoissa A, B ja C. Aikaikkunat perustuvat kasvillisuuden sekä mahdollisten tulvien seurantaan. Keilausaikaikkunalla A

tarkoitetaan kevään ajanjaksoa, jolloin maastossa on lunta alle 5 cm, eikä puissa ole lehtiä. Keilausaikaikkuna A tarkoittaa käytännössä ajankohtaa maaliskuun lopusta toukokuun alkuun ja aikaikkuna vaihtelee alueittain. Keilausaikaikkuna B alkaa yhtä aikaa aikaikkunan A kanssa, mutta jatkuu ajankohtaan asti, jolloin aluskasvillisuus alkaa merkittävästi kasvaa. Keilausaikaikkunalla C tarkoitetaan ajankohtaa, jolloin koivussa on lähes täysi lehti ja aikaikkuna päättyy siihen, kun lehdet alkavat merkittävästi kellastua. Ajankohtana tarkoitetaan käytännössä aikaa kesäkuun alusta elokuun loppuun, mutta aikaikkuna voi vaihdella alueittain. Lentolaserkeilaukset pyritään suorittamaan alueittain yhden aikaikkunan aikana, jotta laserkeilauksen laatu pysyisi vakiona (Ahokas ym. 2020 s. 9).

2.1.3 Lentolaserkeilauksen hyödynnettävyys ympäristötutkimuksissa

Lentolaserkeilauksen käyttö on kasvanut 1990-luvulta lähtien tekniikan kehityksen myötä (Hyypä ym. 2008 s. 1340) ja sitä onkin käytetty aktiivisesti infrarakentamisessa mm. maastomallin (Liikennevirasto 2011) sekä korkeusmallin tuottamiseen (Ahonen 2019). Muita sovellusalueita ovat mm. metsätutkimukset, tulvamallinnukset, hulevesien kulkeuman tutkimukset sekä turvesoiden korkeusmallinnukset ja louhosten tilavuuksien mittaaminen, unohtamatta arkeologian ja infrastruktuurin muita sovelluksia kuten melumallinnuksia ja näkyvyysanalyyskejä (Vilhomaa ja Laaksonen 2011 s. 89). Lisäksi lentolaserkeilausta hyödynnetään myös lumitutkimuksissa, joista lisää kappaleessa 2.2.4.

Metsäinventoinnissa käytetään usein termejä yksinpuintulkinta ja aluepohjainen tulkinta. Yksinpuintulkinta vaatii tiheäpulssisen laserkeilausaineiston, kun taas aluepohjaiseen menetelmään riittää harvempipulssinen laserkeilausaineisto, joka usein yhdistetään koealalta mitattuun hilaruutujen (esim. 16 m * 16 m) sisältämään puustotunnusten paikkatietoon (Maltamo ym. 2008 s. 304). Yleisesti käytettyjä puustotunnuksia ovat maanpintaan suhteutetun korkeusjakauman prosenttipisteet, korkeuden keskiarvo, pisteiden tiheys, sekä keskihajonta että variaatiokerroin (Naasset 2002 s. 88). Tyypillisesti laserkeilausaineistosta muodostetaan maastomalli, jonka tarkkuus vaihtelee 10 – 50 cm riippuen laskentamenetelmästä (Takeda 2004; Hyypä ym. 2004). Kuitenkin lentolaserkeilauksen perusteella saatu tieto puuston korkeudesta on usein aliarvio, koska paluukaiku osuu harvoin latvuksen korkeimpaan kohtaan (Hyypä ym. 1999 s. 27). Intensiteetillä kuvataan paluukaiuin voimakkuutta ja sitä voidaan hyödyntää esim. puulajitulkinnassa (Korpela ym. 2010). Korhonen (2011b s. 3) tutki laserkeilauksen

soveltuvuutta latvuspeittävyiden määrittämiseen suhteessa perinteisiin menetelmiin, joita olivat Cajanuksen putki, LIS eli mittanauhamenetelmä, densimetri, silmävarainen arviointi, digitaaliset valokuvat sekä regressiomallit. Tutkimuksessaan hän havaitsi laserkeilauksen olevan tarkka menetelmä, mutta johtavan pieneen latvuspeittävyiden yliarvioon, koska pulssien tulokulma ei ole aina kohtisuora. Kamppila (2013 s. 19) vertaili laserkeilauksen ja perinteisen maastoinventoinnin tarkkuutta ja osoitti ettei harvapulssinen laserkeilaus menetelmänä sovi taimikoiden arviointiin. Varhola ym. (2010 s. 816-820) tutkivat laserkeilauksen perusteella määritetyn latvuspeittävyiden käytettävyyttä lumitutkimuksissa. He muodostivat latvuspeittävyiden arvon tavanomaisilla metsien inventointimenetelmillä kesäaikaan maastosta käsin ja laserkeilauksesta muodostetun latvuspeittävyiden yli 2 m laserpisteistä lumimittausten yhteydessä. He totesivat laserkeilauksen olevan hyvä menetelmä tavanomaisiin metsien inventoinnin menetelmiin verrattuna, ja laserkeilauksesta muodostetun latvuspeittävyiden korreloivan hyvin vesiaron, haihtumisen ja lumen kerääntymisen seurannassa verrattuna tavanomaisiin lumimittauksiin. Myöskään Naasset (2004) ja Suvanto (2005) eivät huomioineet alle 2 m korkeuden laserpisteitä tutkimuksissaan, kun taas Korhonen ym. (2011b) käyttivät vastaavana rajana 1,3 m. Useissa tutkimuksissa puustotunnuksia on laskettu vain ensimmäisten ja viimeisten kaikujen avulla (Naasset 2004) tai käyttäen hyväksi kaikkia kaikuja (Woods ym. 2011; Arumäe ym. 2017). Keskimmäisten kaikujen poisjättäminen voi aiheuttaa informaation menetyksiä latvuston alapuolisista osista (Canadian Forest Service 2013 s. 6).

2.2 Lumi

2.2.1 Ilmastonmuutos ja lumen merkitys ympäristölle sekä ihmistoiminnalle

Ilmastonmuutos johtuu kasvihuonekaasujen, kuten hiilidioksidin (CO₂) pitoisuuksien kasvusta ilmakehässä, mikä johtaa maapallon ilmaston lämpenemiseen, jäätikköjen ja ikiroudan sulamisen kiihtymiseen sekä merivesien pinnan nousuun. Ympäri maailmaa on ennustettu kuivien alueiden kuivuuden lisääntyvän ja sään ääri-ilmiöiden voimistuvan kaikkialla unohtamatta entistä voimakkaampia hirmumyrskyjä, rankkasateita, tulvia sekä tukahduttavia helteitä. Ilmastonmuutos uhkaa myös monia kasvi- ja eläinlajeja, jotka eivät ehdi sopeutua ilmastonmuutokseen (IPCC 2021 s. 5-11). Suomessa ilmastonmuutos ilmenee keskilämpötilan nousuna, kasvukausien lämpösummien kasvuna sekä termisten vuodenaikojen siirtymisenä (Ruosteenoja ym. 2016 s. 13-14). Ennusteiden mukaan

sademäärät kasvavat ja etenkin ilmaston lämpenemisen seurauksena Etelä-Suomen talvet tulevat muuttumaan entistä sateisimmiksi. Sateiset talvet voivat kasvattaa talvitulvien riskiä, mikä puolestaan johtaa kevään tulvien pienenemiseen (Parjanne ym. 2020 s. 8-9). Sademäärien kasvu johtaa lumipeitteen kokonaismäärän pienenemiseen koko maassa, vaikka lumisateiden ennustetaan pysyvän Pohjois-Suomessa lähes ennallaan. Pohjois-Karjalasta Lappiin ulottuvalla vyöhykkeellä puiden oksille kertyvän lumikuorman ennustetaan lisäävän lumituhoja (Venäläinen ym. 2020 s. 3-4) ja jopa pohjoisen havumetsävyöhykkeen ennustetaan siirtyvän pohjoisemmaksi, jolloin lehtipuut valtaavat kasvualaa (Kellomäki ja Leinonen 2005 s. 15). Ilmaston lämpenemisen seurauksena roudan syvyyden ennustetaan myös pienenevän ja routa vaikuttaa maaperään entistä lyhyemmän ajan (Gregow ym. 2011 s. 38-40). Ennusteen mukaan maaperän kosteus tulee myös pienemään, mikä saattaa johtaa pitkien hellejaksojen ohella esim. kasvavaan metsäpalariskiin. Auringonsäteilyn määrän ennustetaan pysyvän ennallaan tai hiukan vähenevän talviaikoina, kun taas auringonsäteilyn määrä kesällä pysyy ennallaan tai hieman kasvaa (Lehtonen ym. s. 19-21, 29).

Ilmastonmuutoksen myötä maapallon keskilämpötila on noussut erityisesti talvella (Mikkonen ym. 2015 s. 1521) ja tämän seurauksena mm. lumen ja jään määrä on vähentynyt ja kevään lumipeitteen ennustetaan pienenevän vuosisadan loppuun mennessä eri skenaarioiden mukaan jopa 38 - 81 % (Ruosteenoja 2014 s. 4, 28). Lumipeitteen katoaminen ja lumipeitteisen ajanjakson lyheneminen vaikuttavat suoraan lumen albedoon eli lumen heijastavuuteen, joka on tyypillisesti 0,8 – 0,9 ja vettyneelläkin lumella vielä 0,5 (Pomeroy ja Brun 2001 s. 47, 75-76). Lumi siis heijastaa suuren osan saapuvasta auringonsäteilystä takaisin ilmakehään sekä avaruuteen ja estää siten auringonsäteilyn imeytymisen maanpintaan, joka taas lämmittäisi ilmakehää (Cohen 1991 s. 703-704). Pienenevän lumipeitteisen alueen myötä yhä suurempi osa saapuvasta säteilystä päätyy suoraan maaperään ja siten kiihdyttää ilmastonmuutosta. Lumipeitteen pienemisellä ja lumipeitteisellä ajanjaksolla on siis huomattava vaikutus lumen albedoon ja siten suoraan ilmastoon. Lumi onkin siksi varsin tärkeässä osassa hydrologisissa ja ilmastoon liittyvissä prosesseissa (Sicart ym. 2004 s. 774) sekä maailmanlaajuisessa ja paikallisessa ilmastossa, kuten myös ekologiassa (Rasmus 2005 s. 184), joten lumen tutkimuksen merkitys korostuu entisestään ilmaston muuttuessa.

Ilmaston lämpenemisen ennustetaan voimistavan ja nopeuttavan veden hydrologista kiertoa, jolloin sateisilla alueilla sademäärät kasvavat ja kuivilla alueilla sademäärät vähenevät entisestään (Klöve 2019). Lumi on osa veden hydrologista kiertoa, jolla tarkoitetaan veden jatkuvaa kiertoa varastosta (meri, järvet, pohjavesi, maavesi, lumi, jäätiköt ja ilmakehä) toiseen olomuotoa vaihtaen. Suomessa osa sadannasta tulee lumena ja lumipeite muodostaa vesivaraston, josta vesi palautuu takaisin kiertoon keväällä tapahtuvan sulamisen myötä (Leppäranta ym. 2017 s. 56-57). Maailmanlaajuisesti vesivarannoista 2,5 % on makeaa vettä, ja suurin osa tästä makeasta vedestä on varastoituneena jäätiköihin tai pohjavesiin (Oki ym. 2006 s. 1068). Osa makean veden varastoista täyttyy kuitenkin vuosittain satavan kausittaisen lumen ansiosta. Sen peittämä alue voi olla n. 30 % maailman maapinta-alasta ja tästä lumipeitteestä valtaosa sijaitsee pohjoisella pallonpuoliskolla (Robinson ym. 1993 s. 1693).

Kausittain satavasta lumesta haihtuu talven aikana vain murto-osa (Kuusisto 1984 s. 58) ja suurin osa satavasta lumesta päättyy myöhemmin kevään alettua osaksi kevätvaluntaa, joka on tärkeä osa veden hydrologisessa kierrossa. Lumen sulamisen mukana ympäristöön huuhtoutuu myös hiukan ravinteita (Jones ja Pomeroy 1999 s. 7). Kevään tulvat mahdollistavat sulamisvesien hyödyntämisen sähköntuotannossa (Hill ym. 2020), ja vesivoiman osuus Suomen sähköntuotannosta onkin vaihdellut 15 - 25 % (Motiva 2021). Muuttuvat talvet haastavat vesivoimaa hyödyntäviä energiayhtiöitä kehittämään toimintaansa, kun ne eivät voi enää luottaa lumisateista muodostuneiden sulamisvesien täyttävän talven aikana tyhjentyneet patoaltaat. Sulamisvesiä hyödynnetään myös joiltain osin maataloudessa kasteluvetenä (Biemans ym. 2019), mutta pääasiassa kevään tulvien pieneminen on maatalouden kannalta kuitenkin hyvä asia, sillä pitkään kestävät tulvat ja korkealle noussut vesi aiheuttavat haittaa viljelytoiminnalle. Haittaa maataloudelle aiheuttavat myös pitkät talvet, jotka lyhentävät kasvukautta (Winkler ym. 2018 s. 8). Ilmastonmuutoksen myötä myös metsäyhtiöt joutuvat kehittämään toimintaansa, koska perinteisesti talven kylmät olosuhteet, hyvä jäättilanne sekä riittävä lumipeite ovat tärkeitä mahdollistajia puunkorjuulle haastavien (turvemaat, vesistöjen ylistykset) taipaleiden takaa (Kokkila 2013 s. 6). Lumi on elinehto mm. Lapin ja Keski-Euroopan matkailulle, ja lumi tarjoaakin mahdollisuuksia matkailualalla esim. hiihtokeskuksissa (Komu ja Kivelä-Pelkonen 2011). Kuitenkin talven lumipeitteisen ajan lyheneminen ja epävarmuus voivat johtaa matkailualalla palveluiden saatavuuden vähenemiseen. Lumi toimii myös eristeenä estäen maaperän lämmön karkaamisen ja samalla heijastaa osan auringon

lyhytaaltoisesta säteilystä takaisin avaruuteen estäen siten maanpinnan lämpenemisen (Cohen ja Rind 1991 s. 705). Lumipeite siis toimii eristeenä lumen alla talvehtiville kasveille ja tarjoaa suojaa mm. eliöstölle (Niittynen 2020 s. 4). Lumipeitteen tarjoama suoja on kuitenkin pienemässä ilmastomuutoksen seurauksena, ja tästä kärsivät etenkin arktisten alueiden kasvit, jotka ovat jo ennestään uhanalaisia, ja joiden sopeutuminen muuttuvaan ilmastoon voi olla kasvien kannalta liian hidasta.

2.2.2 Lumen ominaisuudet

Jääkiteet, nestemäinen vesi, kaasunkalot ja tietyt epäpuhtaudet muodostavat lumen. Tiheys, kidekoko ja kidemuoto sekä vesiarvo ovat lumen tärkeimpiä fysikaalisia ominaisuuksia. Talven eteneminen ja sääolojen muutos vaikuttavat lumen rakenteeseen ja tätä muutosta kutsutaan metamorfoosiksi. (Leppäranta ym. 2017 s. 86-88)

Suomessa ensilumi sataa tavallisesti Pohjois-Suomeen elo-syyskuussa ja pysyvä lumipeite tyypillisesti loka-marraskuussa. Etelä-Suomeen pysyvä lumipeite saadaan todennäköisesti joulutammikuussa. Pysyvällä lumipeitteellä tarkoitetaan talven yhtenäistä ajanjaksoa, jolloin lunta on maassa vähintään 1 cm. Etelä-Suomessa lumipeite katoaa maaliskuun loppuun saakka, kun Pohjois-Suomessa lumipeite voi viipyä maassa toukokuun loppuun saakka. Lumipeitteen paksuus on yleensä suurimmillaan Pohjois-Suomessa huhtikuun alkupuolella, kun Etelä-Suomessa eniten lunta on tyypillisesti puolessavälissä maaliskuuta. (Ilmatieteenlaitos 2020)

Lumitutkimuksessa tärkeimmät tutkittavat arvot ovat lumen syvyys ja lumen vesiarvo. Lumen vesiarvo tarkoittaa sulatetun lumen vesimäärää ilman valunta- tai haihduntahäviöitä. Lumen syvyys ilmoitetaan usein yksikössä [m] ja lumen vesiarvo yksikössä [mm] tai [kg/m²] (Leppäranta ym. 2017 s. 89). Lumen tiheys [kg/m³] (1) ja lumen vesiarvo [kg/m²] tai [mm] (2) lasketaan seuraavilla yhtälöillä:

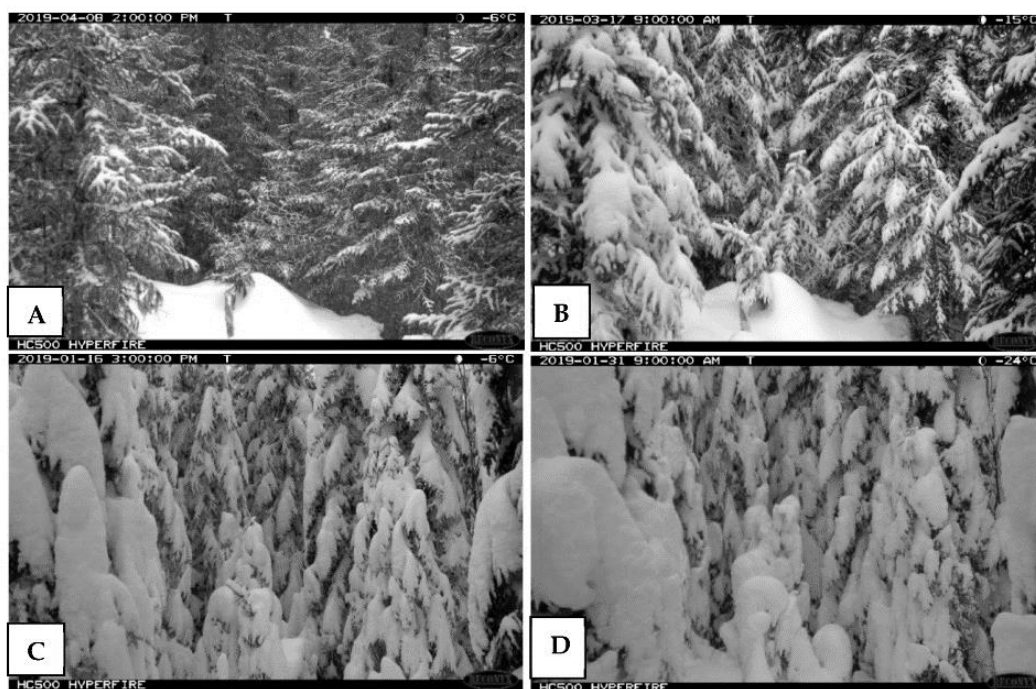
$$Ps = \frac{M}{V}, \quad (1)$$

missä Ps on lumen tiheys [kg/m^3],
 M on luminäytteen massa [kg] ja
 V on lumen tilavuus [m^3].

$$SWE = d \times Ps, \quad (2)$$

missä SWE on lumen vesiarvo [mm] tai [kg/m^2],
 d on luminäytteen syvyys [m] ja
 Ps on lumen tiheys [kg/m^3].

Lumipeitteen paksuuteen ja tiheyteen vaikuttaa sadanta, ilman lämpötila ja kosteus, tuulen nopeus ja suunta sekä sääolosuhteet lumisateiden välissä. Lisäksi topografialla ja kasvillisuudella on oma vaikutuksensa (Kuusisto 1984 s. 31). Metsässä puusto sieppaa lunta latvustoonsa eli puhutaan latvusinterseptiosta. Latvusinterseption osuus voi olla jopa 10 – 45 % kaikesta lumisateesta talven aikana (Pomeroy ym. 1998 s. 2336). Puuston latvusinterseptiota on havainnollistettu kuvassa 2. Hetkellisesti lumisateesta kuusi voi siepata jopa 60 % kun mänty sieppaa 45 % (Pomeroy ja Gray 1995 s. 32). Lunta kertyy enemmän avoimille alueille ja metsän aukoille kuin harvempaan metsään ja harvempaan metsään enemmän kuin tiheämpään metsään (Heikkilä 2014 s. 62-66; Hojatimalekshah ym. 2021 s. 2194). Lumen syvyys on metsässä myös epätasaisempaa kuin avoimilla alueilla (Broxton ym. 2014 s. 1073), joilla erityisesti tuuli liikuttaa lunta ja vaikuttaa siten lumen kertymiseen (Kuusisto 1984 s. 29; Mott ym. 2018 s. 16-17). Myös topografia vaikuttaa lumen kertymisen vaihteluihin, jolloin lumen määrä kasvaa tietyille korkeustasolle saakka (Grünwald ym. 2014 s. 2389-2390) tai rinteen suojaan kertyy enemmän lunta (López-Moreno ym. 2013 s. 5-10).



Kuva 2. Puuston latvuspöytä kasvaa talven edetessä A - D. (Duperat ym. 2020 s. 6)

Lumen tiheys muuttuu talven edetessä ollen n. 100 kg/m^3 vastasataneelle lumelle ja sulamisaikana n. 300 kg/m^3 (Kuusisto 1973 s. 3). Lumen tiheys voi nousta talven edetessä jopa 400 kg/m^3 (Oksanen 1999 s. 17). Oksanen (1999 s. 59) havaitsi myös lumen tiheyden muuttuvan ilmastoluokkien mukaan, mutta pysyvän alueellisesti samankaltaisena, vaikka lumen syvyys vaihtelisi vuodesta toiseen. Lumen tiheys on suurempaa avoimilla alueilla ja metsän aukoilla kuin metsässä (Jenicek ym. 2018 s. 50) johtuen mm. tuulesta (Kuusisto 1984 s. 29; Meløysund 2007 s. 418) ja auringonsäteilystä (Meløysund 2007 s. 419). Lumi voi kuitenkin pudota puiden oksilta maahan ja siten tiivistyä. Suomen olosuhteissa lumen maksimivesiarvon keskiarvo kasvaa Etelä-Suomesta Pohjois-Suomeen ollen 100 – 200 mm. Keskimääräinen maksimivesiarvon esiintymispäivä on Etelä-Suomessa maaliskuun puolivälissä ja Pohjois-Suomessa toukokuun vaihteessa (Perälä ja Reuna 1990 s. 23). Lumen tiheyteen ja siten myös vesiarvoon vaikuttavat jo aiemmin mainittujen tuulen ja auringonsäteilyn lisäksi metsän ominaisuudet esim. 0 – 2 m etäisyydellä puusta lumen vesiarvo on matalampi kuin 3 – 4 m etäisyydellä puusta (Pomeroy ja Brun 2001 s. 71). Jenicek ym. (2018 s. 50) havaitsivat lumen vesiarvon vaihtelevan latvuksien ominaisuuksien mukaan, mutta vesiarvo oli pääsääntöisesti 40 % alhaisempi metsissä kuin avoimilla alueilla.

Heijastavuus, heijastuskyky tai toisin sanoen albedo tarkoittaa kappaleen esim. lumen kykyä heijastaa siihen osuvaa säteilyä takaisin ilmakehään. Albedo ilmaistaan usein suhdelukuna ja tyypillisesti tuoreen lumen albedo vaihtelee 0,8 - 0,9 tai 80 - 90 % välillä muuttuen keväämmällä lumen vettymisen vuoksi albedoltaan arvoon 0,5 ja lumen likaantuessa arvoon 0,3 (Pomeroy ja Brun 2001 s. 47, 75-76). Albedon määrä on siis hyvin riippuvainen lumipeitteestä ja lumipeitteisen kauden pituudesta. Manninen (2018 s. 14-15) toteaa lumen albedon olevan suurinta avoimilla alueilla ja albedon määrän pienenevän metsän tihentyessä. Kuitenkaan tiheydeltään samanlaisella kuusivaltaisella ja mäntyvaltaisella metsällä ei näyttäisi olevan vaikutusta lumen albedoon.

Lumen sulamiseen vaikuttaa lämmön siirtyminen ympäristöstä lumipeitteeseen, maanpinnan kaltevuus, rinteiden suunta, kasvillisuus, lumen tiheys, lumen lämpötila ja albedo eli heijastavuus (Kuusisto 1973 s. 3). Suurin vaikutus on kuitenkin lämpötilalla. Lumen sulaminen tapahtuu avoimilla alueilla nopeammin kuin metsäisillä alueilla (Kuusisto 1984 s. 87; Jenicek 2018 s. 50) ja lumi sulaa nopeammin harvemmasta metsästä kuin tiheästä metsästä (Kuusisto 1984 s. 87).

2.2.3 Lumen ominaisuuksien mittaus

Suomen Maantieteellinen Seura käynnisti ensimmäiset lumen syvyysmittaukset 1891-1892, jonka jälkeen Meteorologinen Keskuslaitos käynnisti ensimmäiset lumilinja-mittaukset 1922-1923 ja lumilinja-mittausverkosto perustettiin 1935-1936 (Kuusisto 2008 s. 45). Kaukokartoitusmenetelmien kehittyessä vuonna 1976 Suomessa aloitettiin tutkimukset gammasäteilyn hyödyntämisestä lumen vesi-arvon tutkimuksessa (Kuittinen 1979 s. 5), jonka jälkeen lumitutkimuksissa on hyödynnetty aktiivisesti sääsatelliittien dataa niiden mahdollistettua laajan ja säännöllisen havaintodatan. Myös kaukokartoitusmenetelmiin luettava laserkeilaus mahdollistaa laajojen alueiden lumitutkimuksen ja antaa hyvän referenssitiedon satelliittihavainnoille (Anttila 2019 s. 51).

Lumilinja-mittauksia tehdään, jotta saadaan tarvittavaa tietoa vesistösuunnitteluun, säännöstelyyn, tulvien torjuntaan, lumikuormavaroituksiin sekä ilmastonmuutoksen tutkimuksiin. Lumilinja on kahdenlaisia; ns. lyhyet linjat ovat pituudeltaan n. 2 km ja näillä reiteillä kerätään tietoa lumen syvyyden sekä vesi-arvon lisäksi roudan syvyydestä. Pitkät linjat koostuvat n. 4 km pituisista reiteistä, jotka sisältävät 80 lumen

syvyysmittauspistettä ja kahdeksan punnituspistettä. Lisäksi jokaiselta mittauspisteeltä tallennetaan tieto maastotyypistä (aukea, metsän aukko, mäntyvaltainen metsä, kuusivaltainen metsä, lehtipuuvaltainen metsä, suo) sekä ympäristön ominaisuuksista, kuten metsän tiheys (1 - 5) tai rinteiden suunta ja jyrkkyys. Lumilinjamittaukset suoritetaan pitkillä lumilinjajoilla jokaisen kuukauden 16. päivä ja lyhyillä linjoilla jokaisen kuukauden 15. päivä maan ollessa vähäinkin lumen peitossa. Lisäksi ylimääräisiä mittauksia suoritetaan tarpeen mukaan, jotta saataisiin määritettyä mahdollisimman tarkasti lumen vesiaron maksimi. (Vesivarat ryhmä - SYKE 2020 s. 44-48)

Lumilinjamittauksissa lumen syvyys mitataan käyttäen mittasauvaa, joka on esimerkiksi puukeppi, johon on kirjattu mitta-asteikko. Mittasauva painetaan lumikerroksen läpi maanpintaan saakka ja lumen syvyys mitataan mitta-asteikosta. Mittaus toistetaan muutaman kerran eri kohdista, jotta saadaan suljettua pois mahdollinen mittausvirhe. Näiden muutaman mittaustuloksen perusteella lasketaan mittausten keskiarvo ja saadaan selville mittauspisteen lumen syvyys. Mittaustulos voidaan varmistaa kaivamalla maanpintaan asti ulottuva pystyseinäinen kuoppa, josta mitataan kuopan syvyys. Lumi punnitaan lumipuntarilla, johon kuuluu tankovaa'an lisäksi mitta-asteikolla varustettu lieriö, jonka pituus on vähintään 50 cm. Tankovaa'an mitta-asteikko kertoo lumen vesiaron yksikössä mm eli lumikuorman yksikössä kg/m². Lumipunnitus suoritetaan jokaisella punnituspisteellä punnitsemalla lieriö ensin tyhjänä, koska lieriöön voi kertyä mittausten edetessä esimerkiksi jäätä. Tyhjän lieriön punnituksen jälkeen kaivetaan lumeen yhdeltä sivulta pystyseinäinen kuoppa, joka ulottuu maanpintaan saakka. Pystysuoraisen seinän alle maanpintaa vasten työnnetään lapio, jonka päälle tulee lumen pinnasta maanpintaa kohti hivutettu lieriö. Lieriön mitta-asteikosta luetaan lumen syvyys, jonka jälkeen lieriö nostetaan lumesta ja punnitaan. Lumen syvyyden ollessa lieriön pituutta suurempi, on punnitus suoritettava vaiheittain useammassa erässä. (Vesivarat ryhmä - SYKE 2020 s. 49-53)

2.2.4 Lumen kaukokartoitusmenetelmät

Kaukokartoituksella tarkoitetaan tiedon hankintaa kohteesta ilman fyysistä kosketusta eli tieto kerätään pääasiassa satelliittien ja lentokoneiden sisältämien mittalaitteiden avulla (Ympäristöhallinto 2004 s. 2). Kaukokartoitus tapahtuu tyypillisesti, kun mittalaitte havainnoi eri aallonpituuksia käyttäen hyödykseen mitattavan kohteen heijastaman tai emittoiman sähkömagneettisen säteilyn (Moisander 2014 s. 8). Yleisimpiä

kaukokartoituksen sovelluskohteita ovat maa, meret, kasvillisuus, ilmakehä sekä tietenkin lumi. Tyypillinen lopputuote on laajalta alueelta muodostunut rasterimuotoinen kuva, josta voidaan erottaa tutkittava kohde, kun on tiedossa tutkittavalle kohteelle sopivin aallonpituusalue.

Lumen kaukokartoitusta tehdään pääasiassa satelliittien tarjoamien havaintojen perusteella, mutta myös laserkeilaus on hyvä vaihtoehto. Satelliittiperusteinen lumen kaukokartoitus perustuu pääasiassa lumen heijastaman säteilyn mittaamiseen ja kaukokartoituksen menetelmin on tutkittu mm. lumen vesiärvä (Kuittinen 1992; Moisanen 2014) sekä lumen sulamista ja metsän vaikutusta lumen kartoitukseen (Hallikainen ym. 1992). Myös ilmatieteenlaitos on hyödyntänyt kaukokartoituksen menetelmiä tutkiessaan lumen tulo- ja lähtöajankohtia. Tyypillisiä lumen kaukokartoituksen kohteita ovat lumipeite, raekoko, albedo, vesiärvä ja sulaminen (Nolin 2017 s. 1141). Laserkeilausta on käytetty mm. tutkittaessa tiheäpulsseista laserkeilausaineiston hyödynnettävyyttä lumi- ja myrskytuhojen määrittämisessä (Vastaranta ym. 2011). Tutkimuksessa laserkeilaus oli suoritettu kolmesti viiden vuoden aikana, johon aikaväliin myös lumituhot sattuivat. Tutkimuksen perusteella Vastaranta ym. (2011 s. 13-14) totesivat, että usean tiheäpulsseista laserkeilaus perusteella voidaan havaita lumi- ja myrskytuhojen aiheuttamia metsän muutoksia. Kirchner ym. (2014) tutkivat avoimella alueella lumen kertymistä korkeusgradienttia pitkin vertaamalla kesällä suoritettua laserkeilausta talvella suoritettuun laserkeilaukseen. Broxton ym. (2014 s. 1073) havaitsivat kahden vuodenajan laserkeilaus perusteella, että puuston lähellä lumen syvyys vaihtelee enemmän kuin kauempana puustosta olevilla avoimilla alueilla. Hopkinson ym. (2004 s. 328) havaitsivat talviolosuhteissa suoritettua laserkeilaus vääristävän lumen syvyyttä etenkin puuston läheisyydessä. Myöhemmin useat muut tutkijat ja esim. Hopkinson ym. (2013 s. 79) totesivat avoimelle alueelle kertyvän enemmän lunta kuin puustoiselle alueelle. Moeser ym. (2015) yhdistivät kesällä suoritettua laserkeilaus ja useana talvella suoritettua lunimittaukset parantaakseen aiemmin luotua mallia ja vertaamalla mallia Hedströmin ja Pomeroyin (1998) luomaan malliin lumen interseption tutkimisessa. Moeser ym. (2015 s. 5054) totesivat sateen lisääntyessä interseption tehokkuuden kasvavan tiettyyn pisteeseen saakka, jonka jälkeen interseption tehokkuus lähti laskuun. Suhonen ja Rantakokko (2006) laativat Vantaanjoen tulvatorjunnan toimintasuunnitelman hydrologisten tutkimusten perusteella hyödyntäen

mm. laserkeilausaineistoa korkeusmallin luontiin ja lumilinjamittauksia aluevesiarvon määrittämiseen.

3 MENETELMÄ

3.1 Tutkimuksen kuvaus

Tutkimuksessa määritetään lumilinjojen alueella puuston latvuspeittävyysarvot avoimen laserkeilausaineiston pohjalta. Lumilinjojen mittaushavainnoista määritetään metsätyypeittäin latvusinterseptio sekä vesi-arvo ja näitä havaintoja verrataan puuston latvuspeittävyyteen.

Tutkimus toteutettiin Suomen Ympäristökeskuksen (SYKE) valtakunnallisten lumilinjamittausten pohjalta. Tutkimuksessa käytetty aineisto on vuosilta 1947 – 2019 ja käsittää 23 mittaustaikaa lumidatan, joissa jokaisessa on 80 mittauspistettä. Lumen ominaisuuksista on mitattu paikallisen lumen mittaajan toimesta lumen syvyys ja lumen vesi-arvo on mitattu vähintään kahdeksalta mittauspisteeltä. Lisäksi mittauspisteet on sijoitettu erilaisiin metsä- ja maastotyyppisiin ja nämä on luokiteltu metsätyypin sekä metsän tiheyden mukaan. Lumilinjamittausten havainnot on tallennettu paikkakunnittain havaintolomakkeille ja lumilinjojen reitit on piirretty karttapohjille mittaajien toimesta. Karttapohjille lumilinjat kuitenkin on piirretty pääosin ilman mittauspisteiden yksilöivää sijaintia. Tutkimuksessa lumilinjakartat georeferoitiin ja lumen mittauspisteet sijoitettiin georeferoiduille kartoille osana tutkimusta. Mittauspisteiden sijainnit määritettiin numerojärjestyksessä kartalle piirretylle lumilinjalle mittaajan laatiman havaintolomakkeen yksityiskohtaisten merkintöjen (metsätyyppi, metsän tiheys, rinteiden suunta) perusteella. Osana tätä tutkimusta mittauspisteet saivat siis koordinaatit.

Laserkeilauksia on suoritettu valtakunnallisesti vuodesta 2008 lähtien. Laserkeilaukset ovat avointa aineistoa ja ne ovat ladattavissa Maanmittauslaitoksen avoimien aineistojen palvelusta (Maanmittauslaitos). Tutkimuksessa puuston latvuspeittävyys määritettiin lumilinjojen alueilta avoimen laserkeilausaineiston perusteella, joten lumitutkimuksen ajankohta oli sidottava mittaustaikaa laserkeilauksen ajankohdan ympärille. Ajanjaksoksi valikoitui neljän vuoden sykli, jotta metsä ei ehdi muuttua merkittävästi. Alkujaan tutkimuksessa oli mukana 23 mittaustaikkaa, mutta lopulta tutkimus suoritettiin yhdeksän mittaustaikaa (Kuva 3) tietojen perusteella. Tämä johtui joidenkin kohteiden osalta reittimuutoksista, havaintojen puutteellisuudesta tai lumilinjamittausten linjakartan

epäselvyydestä suhteessa mittauspisteiden antamiin tarkentaviin tietoihin, jolloin lumen mittauspaikan pistekohtaista sijaintia ei pystytty luotettavasti sijoittamaan kartalle.



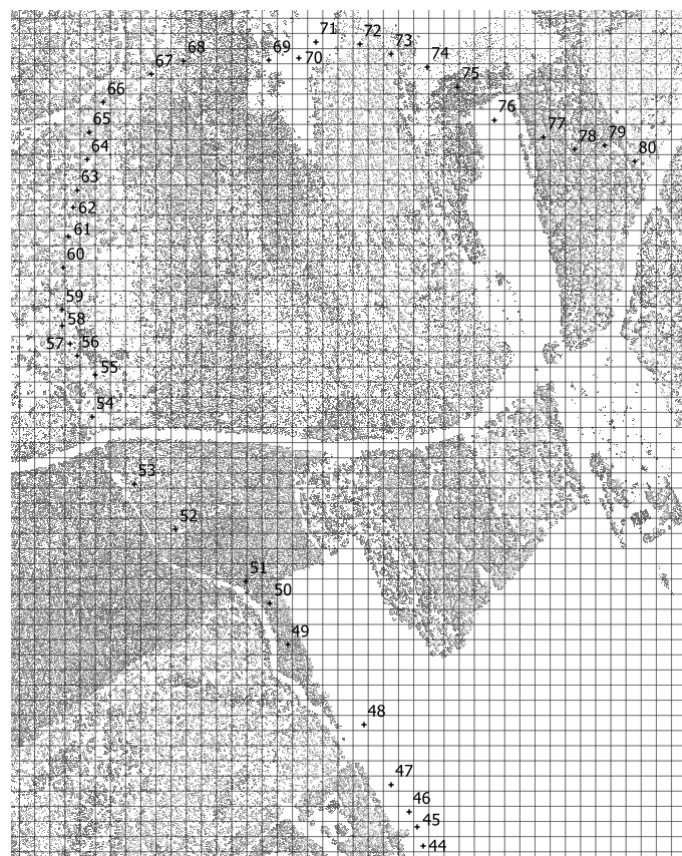
Kuva 3. Tutkimuksen mittauspaikat yleiskartalla. Aineisto: Maanmittauslaitos, taustakartta.

Tutkimuksen luotettavuutta on arvioitu vertaamalla laserkeilauksen perusteella määritettyjä latvuspeittävyiden arvoja saatavilla oleviin muiden tiedontuottajien arvioihin latvuspeittävydestä. Latvuspeittävyiden luotettavuus on arvioitu määrittämällä keskineliövirheen neliöjuuri eli RMSE (Root Mean Square Error). Lumen vesiaron ja latvuspidätyksen voimakkuuden muutosta latvuspeittävyiden muuttuessa on testattu varianssianalyysillä ANOVA (Analysis of Variance).

3.2 Latvuspeittävyiden määrittäminen

Latvuspeittävyys eli latvuspeitto ilmaistaan prosenttilukuna 0 – 99 %. Latvuspeittävyys tarkoittaa prosenttiosuutta latvuksen peittämästä pystysuorasta alueesta suhteessa pinta-

alaan. Tutkimuksessa latvuspeiton prosenttiosuus on määritetty ottamalla huomioon kaikki avoimen laserkeilauksen kaiut yli 2 metrin korkeudelta maanpinnasta. Kuitenkin selvät puuston yläpuoliset pisteet on poistettu. Usein latvuspeittävyuden prosenttiosuus lasketaan latvukseen osuneiden kaikujen suhteena maahan osuneisiin kaikuihin (SYKE 2021 s. 3) tai muuntamalla laserpisteet rasteripikseleiksi ja vertaamalla pikseleiden määrää alueen kokoon (Arumäe ym. 2017 s. 133). Kuvassa 4 on esitetty osa Jalasjärven lumilinjan mittauspisteistä yhdessä laserpisteiden kanssa hilaruudukossa, jolle latvuspeittävyys määritettiin. Latvuspeittävyys määritettiin muuntamalla laserpisteet rasteripikseleiksi ja vertaamalla pikseleiden määrää alueen pinta-alaan, joka tässä tutkimuksessa oli yleisesti Suomen metsien inventoinnissa käytetty hilaruudukko 16 m * 16 m. Latvuspeittävyuden määrittämisessä käytettiin vain kaikki yli 2 metrin korkeudella olevat laserpisteet.



Kuva 4. Jalasjärven lumilinjan mittauspisteitä yhdessä laserpisteiden kanssa hilaruudukossa.

Laserkeilaukset (Taulukko 1) on suoritettu pääasiassa ajanjaksona, jolloin puussa on lehti. Latvuspeittävyuden arvo on muunnettu vastaamaan talven lehdetöntä tilannetta, joten

lehtipuuvaltaisten metsien latvuspeittävyiden arvoa on korjattu korjauskertoimella 0,85 (Twedt ym. 2015 s. 928).

Taulukko 1. Tutkimuksen ajankohdat ja laserkeilauksen perustiedot.

Nimi	Tutkimus ajankohta	Laserkeilaus pvm	Lentokorkeus [m]	Aikaikkuna	Multipulse	Laserkeilain
Ilomantsi	12/2012- 4/2016	23.5.2015	2144	B	Kaksi pulssia	Leica Inc ALS 60
Jalasjärvi	1/2016- 3/2019	30.6.2019	2680	C	Rajoittamaton	Riegl, VG- 780i
Kittilä	11/2015- 4/2019	23.7.2019	2590	C	Rajoittamaton	Riegl, VG- 780i
Multia	10/2013- 5/2017	14.7.2013	1839	C	Ei	Optech Inc, ALTM GEMINI
Pudasjärvi	11/2015- 4/2019	9.7.2018	1830	C	Ei	Optech Inc, ALTM GEMINI
Pulkila	1/2014- 4/2017	12- 13.6.2013	1950	C	Ei	Optech Inc, ALTM GEMINI
Salla	11/2014- 3/2018	19.7.2018	2931	C	Rajoittamaton	Riegl, VQ- 1560i
Sodankylä	11/2014- 4/2018	27.7.2018	2964	C	Kaksi pulssia	Riegl, VQ- 1560i
Taivalkoski	12/2015- 4/2019	10.7.2018	1830	C	Ei	Optech Inc, ALTM GEMINI

Laserkeilauksen luotettavuutta on arvioitu vertaamalla latvuspeittävyiden arvoja muiden viranomaisten määrittämiin latvuspeittävyiden arvoihin. Metsäntutkimuslaitos (Metla), myöhemmin Luonnonvarakeskus (LUKE) aloitti vuonna 1990 valtakunnan metsien monilähteen inventoinnin (MVMI), joka perustuu satelliittikuvien sekä muiden kaukokartoitusmenetelmien, maastotietojen ja muun numeerisen paikkatiedon hyödyntämiseen. Avoimesti saatavilla oleva MVMI aineisto sisältää tiedot latvuspeittävydestä 16 m * 16 m hilaruutuina ja tätä vuoden 2017 MVMI kartta-aineistoa käytetään tutkimuksessa referenssiaineistona. Latvuspeittävyiden tiedot on kerätty aiempien vuosien havaintojen perusteella hyödyntäen k-NN-menetelmää ja luodulla regressiomallilla (Luonnonvarakeskus). Suomen Metsäkeskus tuottaa myös metsävaratietoa 16 m * 16 m hilaruutuihin ja metsävarakuvioina. Metsävaratiedot perustuvat koelamittauksiin, ilmakuvauksiin ja laserkeilaukseen. Avoimesti saatavilla

oleva metsäkeskuksen hila-aineisto sisältää ruuduittain tiedot laserkorkeudesta (laserheight) ja lasertiheydestä (laserdensity). Laserkorkeus hilalla ilmoitetaan metreinä [m] ja se kuvaa sitä pistepilven korkeusjakauman kohtaa, johon mennessä on kertynyt 95 % ensimmäisistä ja ainoista kaiuista. Lasertiheys hilalla ilmoitetaan kappaleina (kpl) ja se kuvaa ensimmäisten ja ainoiden kaikujen osuutta yli $0,4 * \text{''laserheight''}$ korkeudelta ja kuitenkin vähintään 2 m korkeudelta (Metsäkeskus 2021 s. 1). Tutkimustani varten hyödynnän lasertiheyden arvoa referenssitietona latvuspeittävydestä muuntamalla lasertiheyden kappalemäärän kuvaaman lasertiheyttä hilaruudulla arvona 0 – 99 %. Lumilinjamittausten yhteydessä lumilinjoilta on tallennettu lumilinjan mittaajan eli havaitsijan näkemys maaston tiheydestä asteikolla 1 – 5, jossa arvo 1 tarkoittaa harvaa metsää ja arvo 5 tiheää metsää. Myös avoimet alueet on merkitty erikseen. Asteikko 1 – 5 on muunnettu suuntaa antavaksi latvuspeittävyiden arvoksi karkeasti siten, että arvo 1 tarkoittaa latvuspeittävyiden arvoa 10 % ja arvo 5 tarkoittaa latvuspeittävyiden arvoa 90 %.

Taulukossa 2 on esitetty tutkimuksessa käytettyjen lumilinjojen mittauspisteiden määrä metsätyypeittäin. Metsätyypit on luokitellut lumilinjan havaitsija. Tutkimuksen tuloksia tarkastellaan neljän talven maksimilumitilanteen ajankohtana, joten havaintoja on kultakin mittauspisteeltä 4 kpl. Esimerkiksi Ilomantsin tulokset pohjautuvat mäntyvaltaisen metsän osalta $22 \text{ kpl} * 4 \text{ kpl} = 88 \text{ kpl}$ havaintoon. Tutkimuksessa on yhteensä 1092 kpl havaintoa mäntyvaltaisesta metsästä, 368 kpl lehtipuuvaltaisesta metsästä ja 464 kpl kuusivaltaisesta metsästä. Suomessa metsämaasta on 65 % mäntyvaltaista metsää, 24 % kuusivaltaista metsää ja 9,5 % lehtipuuvaltaista metsää (Korhonen ym. 2013 s. 292), kun tutkimuksessa vastaavat prosentiosuudet ovat mäntyvaltaiselle metsälle 57 %, kuusivaltaiselle metsälle 24 % ja lehtipuuvaltaiselle metsälle 19 %.

Taulukko 2. Lumilinjojen mittauspisteiden määrät metsätyypeittäin.

Paikkakunta	Kuusi kpl	Lehti kpl	Mänty kpl
Ilomantsi	17	13	22
Jalasjärvi	18	13	36
Multia	7	10	31
Pudasjärvi	10	9	47
Pulkkila	8	25	21
Taivalkoski	16	0	48
Kittilä	3	17	38
Salla	0	0	11
Sodankylä	37	5	19

3.3 Latvusinterseption ja vesiärvon määrittäminen

Tutkimuksen ajankohdaksi valikoitui neljän vuoden sykli viimeisimmän alueella suoritettua laserkeilauksen ajankohtaan sitoen. Jokaiselle neljälle talvelle on määritetty paikkakuntakohtaisesti maksimilumetilanne eli ajankohta, jolloin lunta on eniten. Latvusinterseption ja lumen vesiärvon laskenta tässä työssä perustuu näihin maksimilumetilanteiden lumimittauksiin. Latvusinterseptio (Kaava 3) on laskettu jokaiselle mittauspisteelle vertaamalla lumen syvyyttä metsässä suhteessa avoimen alueen lumen syvyyksien keskiarvoon.

$$C = 100 - \left(\frac{A}{B} \times 100 \right) \quad (3)$$

missä C on latvusinterseptio %,
A on lumen syvyys [m] metsässä ja
B on lumen syvyyden [m] keskiarvo avoimella mittauspaikalla.

Kaavassa A tarkoittaa lumen syvyyttä metsässä [m] ja B on mittauspaikan avoimen alueiden lumen syvyyden keskiarvo [m]. Vastauksena saatu prosenttiluku C kertoo latvusinterseption määrän. Mahdollinen negatiivinen luku viittaa siihen, ettei latvusinterseptiota olisi tapahtunut. Lumen vesiärvon (Kaava 4) on tutkittu varsin

samanlaisella kaavalla eli muutos on laskettu jokaiselle mittauspisteelle vertaamalla lumen vesi-arvoa metsässä suhteessa avoimen alueen lumen vesi-arvojen keskiarvoon.

$$G = \frac{D}{E} \times 100 \quad (4)$$

missä G on lumen vesi-arvon muutos [mm tai kg/m²],
 D on lumen vesi-arvo [mm tai kg/m²] metsässä ja
 E on lumen vesi-arvon [mm tai kg/m²] keskiarvo avoimella mittauspaikalla.

Kaavassa G kertoo lumen vesi-arvon muutoksen aukeasta metsään, jolloin D tarkoittaa lumen vesi-arvoa metsässä [kg/m²] ja E tarkoittaa avoimien alueiden lumen vesi-arvon keskiarvoa [kg/m²]. Laskentatavat pohjautuvat Broströmin (2020) tutkimukseen lumen latvusinterseption ajallisesta vaihtelusta metsätyypeittäin Suomessa.

3.4 Tilastollinen testaus

Tutkimuksessa erilaisten tietolähteiden perusteella saatuja latvuspeittävyiden arvoja arvioidaan määrittämällä keskineliövirheen neliöjuuri (RMSE), joka on esitetty kaavassa 5.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (5)$$

RMSE kuvaa menetelmien välisiä eroja ja menetelmien väliset erot on selvitetty vertailemalla ristikkäin eri tietolähteistä peräisin olevia latvuspeittävyiden arvoja.

Lumen vesi-arvon ja latvuspäätöksen voimakkuuden muutosta latvuspeittävyiden muuttuessa on tässä työssä testattu varianssianalyysin (ANOVA) avulla. Menetelmällä on mahdollista selvittää eroavatko kahden tai useamman ryhmän keskiarvot tilastollisesti merkitsevästi toisistaan. Yksisuuntaisessa varianssianalyysissä tarkastellaan yhden muuttujan ryhmäkeskiarvojen eroavuuksia ja kaksisuuntaisessa varianssianalyysissä muuttujia on kaksi. Tässä tutkimuksessa varianssianalyysin muuttujia on ollut yksi (latvuspäätös tai vesi-arvo) eli menetelmänä on käytetty yksisuuntaista varianssianalyysia. F-testi on osa varianssianalyysia ja onnistunut testi vaatii normaalijakautuneen tietojoukon ohella nollahypoteesin sekä vaihtoehdoisen hypoteesin.

Nollahypoteesissa tietojoukkojen oletetaan olevan yhtä suuret ja vaihtoehtoisessa hypoteesissa toisen tietojoukon oletetaan olevan suurempi. F-testin tulos eli tässä tutkimuksessa arvo F kuvaa todennäköisyyttä, jolla nollahypoteesi eli tietojoukkojen yhtäläisyys on mahdollista hylätä. Arvoon F liittyvä arvo P kuvaa vertailtavien kohteiden tilastollista merkitsevyyttä. Kun $P < 0,05$, on mahdollista nollahypoteesi ryhmäkeskiarvojen yhtäläisyydestä hylätä eli tällöin kohteet poikkeavat merkitsevästi toisistaan.

Latvuspäätöksen varianssianalyysi on suoritettu kahdessa osassa. Ensimmäisessä osassa on vertailtu tietyn latvuspeittävyuden alueen latvuspäätöksen ryhmäkeskiarvoja toisen latvuspeittävyuden alueen latvuspäätöksen ryhmäkeskiarvoihin. Toisessa osassa tietyn latvuspeittävyuden alueen latvuspäätöksen ryhmäkeskiarvoja on verrattu arvoon 0, jotta saadaan selville tilanne, jossa latvuspäätös muuttuu mahdollisesti tilastollisesti merkitseväksi.

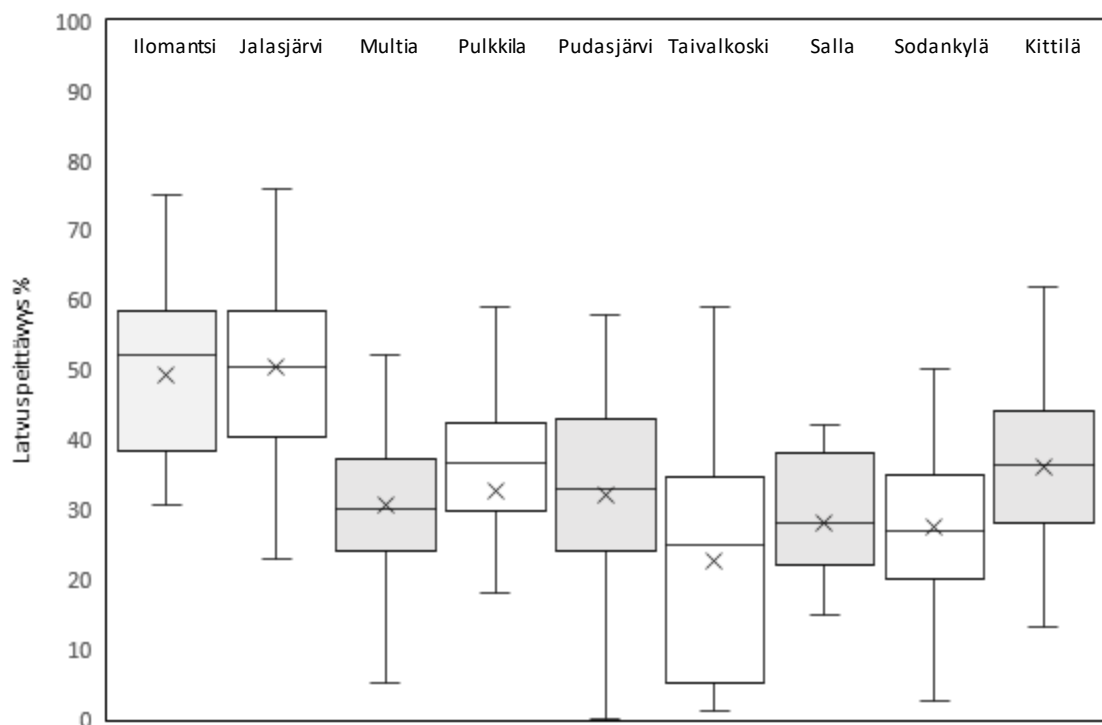
Lumen vesiarvon varianssianalyysi on suoritettu myös kahdessa osassa. Ensimmäisessä osassa on vertailtu tietyn latvuspeittävyuden alueen vesiarvojen ryhmäkeskiarvoja arvoon 0, jotta saadaan selville tilanne, jossa lumen vesiarvo muuttuu mahdollisesti tilastollisesti merkitseväksi. Lumen vesiarvojen osalta on testattu ristiin vertailemalla metsätyypin muutoksen vaikutusta lumen vesiarvoon.

4 TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU

4.1 Latvuspeittävyys

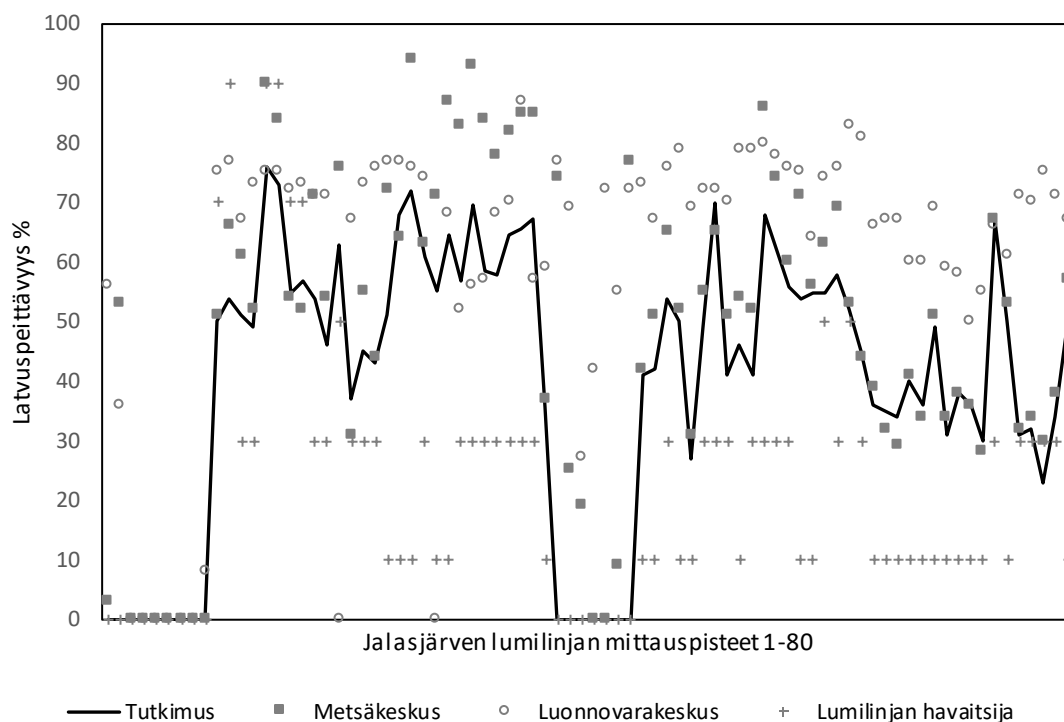
Tutkimuksessa latvuspeittävyiden arvo määritettiin kaikkien yli 2 metrin korkeudella olevien laserpisteiden osuutena yleisesti Suomen metsien inventoinnissa käytettyyn hilaruudukkoon 16 m * 16 m. Tutkimuksessa määritettyä latvuspeittoa verrattiin referenssiaineistoina käytettyihin Luonnonvarakeskuksen määrittämään latvuspeittävyiden arvoon sekä Metsäkeskuksen hila-aineistosta johdettuun tietoon latvuspeittävydestä. Lisäksi latvuspeittoa verrattiin lumilinjan mittausten suorittajan arvioon metsän tiheydestä.

Henttonen ym. (2019 s. 288) tutkivat Suomen metsien kokoluokkarakennetta 1921-2013 välisenä aikana. Tutkimuksen tuloksista voi havaita puuston runkolukujen hehtaarilla olevan suurempaa eteläisessä Suomessa verrattuna pohjoiseen suomeen. Myös Luonnonvarakeskuksen (2019) avoimien aineistojen karttapalvelun perusteella voidaan todeta Suomen metsien latvuspeittävyiden harvenevan etelästä pohjoiseen kulkiessa. Nämä eteläisen Suomen tiheimmät metsät ovat osaltaan havaittavissa kuvasta 5, jossa on esitetty latvuspeittävyiden vaihtelu tutkimuksen paikkakunnittain. Kuvasta voidaan päätellä, että etelän lumilinjoilla on hienoisesti suuremmat latvuspeittävyiden arvot kuin pohjoisilla lumilinjoilla. Erityisesti Ilomantsin ja Jalasjärven lumilinjat poikkeavat muista lumilinjoista latvuspeittävyiden osalta. Ilomantsin ja Jalasjärven lumilinjat poikkeavat muista lumilinjoista myös siten, että ne sijaitsevat ainoina lumilinjoina kuntakeskusten välittömässä läheisyydessä.



Kuva 5. Latvuspeittävyden vaihtelu paikkakunnittain. Merkintä X kuvaa keskiarvoa.

Kuvassa 6 on esitetty Jalasjärven lumilinjaan latvuspeittävyden arvot eri tietolähteiden perusteella. Kuvasta voi havaita latvuspeittävyden arvojen hieman vaihtelevan, mutta erityisesti Metsäkeskuksen ja tutkimuksessa lasketun latvuspeittävyden arvojen olevan samansuuntaiset. Molemmat latvuspeittävyden arvot on määritetty laserkeilauksen pohjalta, tosin hieman eri menetelmillä. Myös Luonnonvarakeskuksen arviot latvuspeittävydestä ovat varsin samansuuntaisia tutkimuksessa määritetyn latvuspeittävyden kanssa. Kuitenkaan Korhosen (2011b s. 3) havaitsemaa laserkeilauksesta muodostetun latvuspeittävyden yliarviota ei voi havaita tapahtuvan ainakaan verrattaessa tietoa Luonnonvarakeskuksen tietoon latvuspeittävydestä.



Kuva 6. Jalasjärven lumilinja latvuspeittävyys mittauspisteillä 1 - 80 eri tietolähteiden perusteella. Lumilinja havaitsijalla tarkoitetaan lumilinja lumimittauksen suorittaneen henkilön arviota metsän tiheydestä.

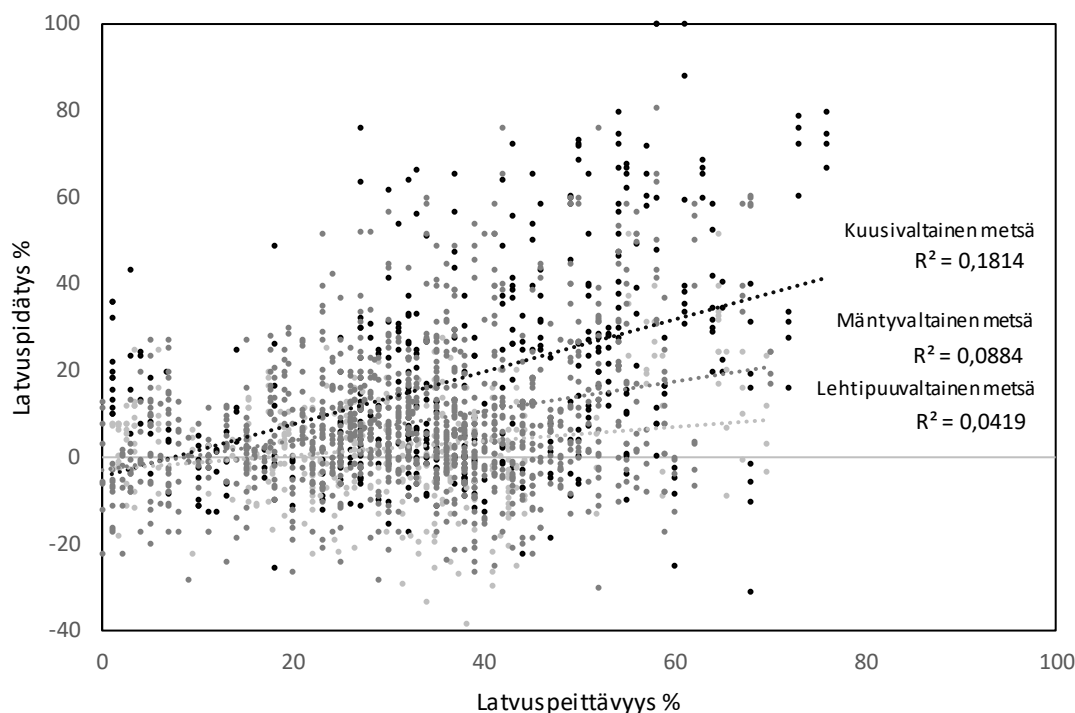
Lopuksi latvuspeittävyys arviot eri tietolähteiden välillä (Taulukko 3) tarkistettiin laskemalla keskineliövirheen neliöjuuri (RMSE). RMSE kuvaa menetelmien välisiä eroja ja arvoista voidaan havaita, että menetelmien välillä on varsin suuria eroja. Korhonen (2011b s. 44-46) vertaili tutkimuksessaan erilaisilla tavalla määritettyjä laserkeilauksen arvoja perinteisiin latvuspeittävyysmittausmenetelmiin (mm. Cajanuksen putki) ja RMSE arvot vaihtelivat pääasiassa n. 3 - 15 %. Tässä tutkimuksessa määritettyjen latvuspeittävyysarvojen RMSE arvot vaihtelivat 18 - 33 % välillä, joten erot menetelmien välillä ovat suhteellisen suuria. Keskivirheen neliöjuuren perusteella voidaan pitää laserkeilauksen perusteella määritettyjä latvuspeittävyysarvioita vain suuntaa antavana tuloksena.

Taulukko 3. Koko Suomen lumilinjojen alueiden latvuspeittävyiden RMSE vertailu eri tietolähteiden perusteella.

		RMSE
Tutkimus	Metsäkeskus	18,601
Tutkimus	Luonnonvarakeskus	27,848
Tutkimus	Lumilinjan havaitsija	28,398
Metsäkeskus	Luonnonvarakeskus	26,355
Metsäkeskus	Lumilinjan havaitsija	33,379
Luonnonvarakeskus	Lumilinjan havaitsija	30,211

4.2 Latvuspeittävyiden vaikutus latvusinterseption

Latvusinterseptio eli latvuspidätys on laskettu (kaava 3) vertaamalla lumen syvyyttä metsässä suhteessa avoimen alueen lumen syvyyksien keskiarvoon. Tuloksista (kuva 7) voidaan todeta latvuspidätyksen olevan odotetusti voimakkainta kuusivaltaisessa metsässä ($R^2 = 0,18$), toiseksi voimakkainta mäntyvaltaisessa metsässä ($R^2 = 0,09$) ja vähäisintä lehtipuuvaltaisessa metsässä ($R^2 = 0,04$). Tulokset vastaavat varsin hyvin ennakkokäsitystä, jonka mukaan latvuspidätys on voimakkaampaa havupuuvaltaisissa metsissä lehtipuuvaltaisiin metsiin verrattuna, sekä latvuspidätyksen kasvavan latvuspeittävyiden kasvaessa (Lundberg ja Koivusalo 2003; Xiao ym. 2019 s. 5705; Kuivalainen 2020 s. 48). Latvuspidätyksen määrä kasvaa varsin tasaisesti latvuspeittävyiden kasvaessa ja keskimäärin latvuspidätyksen määrä korreloi Pomeroy'n ym. (1998 s. 2335) tutkimukseen, jossa he osoittivat, että kaikesta talven aikana satavasta lumesta puut saattavat siepata jopa 10 - 45 %.

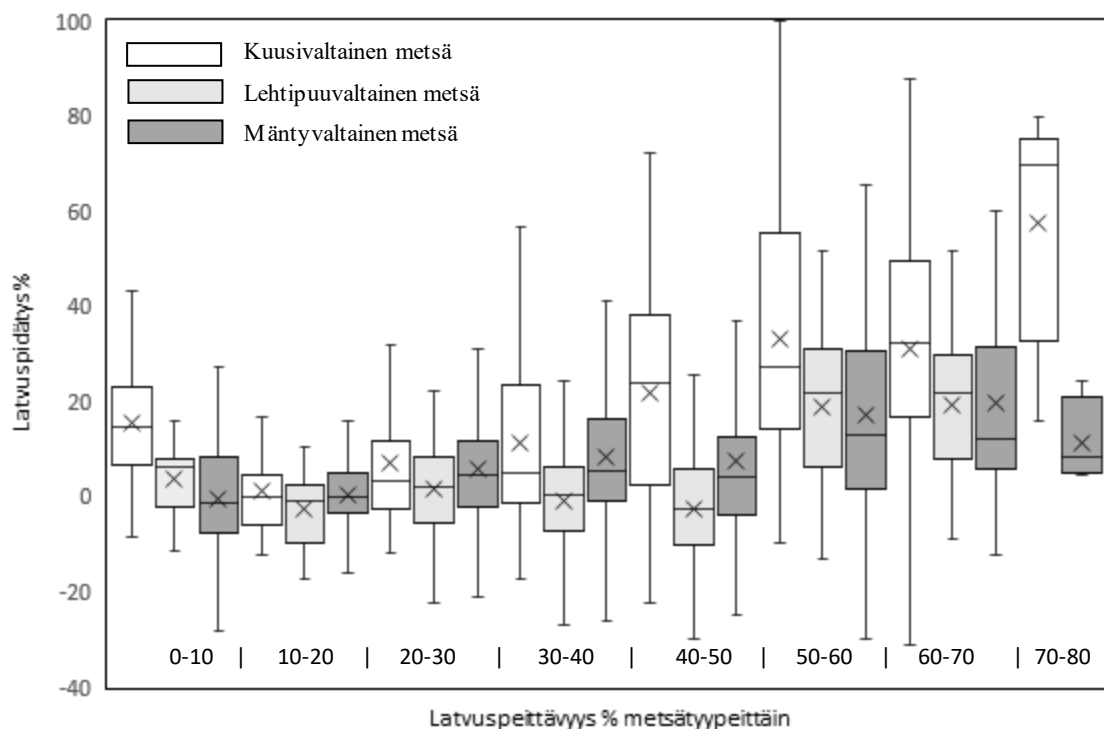


Kuva 7. Latvuspeittävyden vaikutus latvuspäätyseseen. Mustalla värillä kuvattu kuusivaltaisen metsän latvuspäätys. Tummallalla harmaalla on kuvattu mäntyvaltaisen metsän ja vaalealla harmaalla lehtipuuvaltaisen metsän latvuspäätys.

Metsätyyppien R^2 luvut eivät kuitenkaan anna kovin hyvää riippuvuussuhteen voimakkuutta latvuspäätysen ja latvuspeittävyden välille. Xiao:n ym. (2019 s 5705) tutkimuksessa riippuvuussuhteet olivat pääsääntöisesti $R^2 > 0,35$, joten tässä tutkimuksessa saadut riippuvuussuhteet ovat huomattavasti Xiao:n ym. tutkimuksen arvoja heikompia. Koko tutkimuksen ja riippuvuussuhteen kannalta ratkaiseva tekijä on lumen mittauspisteen sijainti oikean latvuspeittävyden omaavalla hilaruudulla, joka lisäksi sisältää myös oikean tiedon metsätyypistä. Paikallinen lumilinjan havaitsija on suorittanut tutkimuksen lumilinjamittaukset sekä laatinut lumilinjasta kartan. Kartalle on piirretty lumilinjan reitti pääosin merkitsemättä lumen mittauspisteitä. Kartta on georeferoitu ja lumen mittauspisteet on sijoitettu georeferoidulle kartalle osana tätä tutkimusta. Mittauspisteiden sijainnit on määritetty numerojärjestyksessä kartalle piirretylle lumilinjalle havaitsijan laatiman pöytäkirjan antamien lisämerkintöjen (metsätyyppi, metsän tiheys, rinteiden suunta) perusteella. Lisämerkintöjen perusteella määritetyt mittauspisteet ovat saaneet siten koordinaatit ja näille pisteille on määritetty hilaruudulle laskettu latvuspeittävyden arvo. Toisin sanoen väärään kohtaan lumilinjalla

sijoitettu lumen mittauspiste saattaa johtaa virheelliseen pistekohtaiseen latvuspeittävyiden arvoon.

Heikoista riippuvuussuhteista huolimatta tuloksista havaitaan odotusten mukaisesti latvuspidätyksen voimakkuuden kasvua latvuspeittävyiden kasvaessa ja havupuuvaltaisten metsien pidättävän lunta lehtipuuvaltaisia metsiä enemmän. Latvuspeittävyiden vaikutus latvuspidätykseen on kuvattu myös toisella tapaa (kuva 8), jotta muutokset latvuspidätyksessä metsätyypeittäin olisi selkeämmin havaittavissa latvuspeittävyiden muuttuessa. Kuusen vankka rakenne ja koko rungon kattava oksisto mahdollistavat tehokkaan sieppauskyvyn verrattuna mäntyyn ja lehtipuihin, sillä näiden puiden oksisto ei kata koko rungon pituutta. Mahat ja Tarboton (2014 s. 6328-6329) havaitsivat havupuiden latvuspidätyksen olevan voimakkaampaa kuin lehtipuilla, johtuen puun rakenteesta eli tiheämmästä latvustosta. Latvustossa oksien välille muodostuu sieppauksen kasvaessa ns. lumisiltoja, jotka mahdollistavat lumen pidättymisen myös näihin siltoihin ja siten pidätyksen voimakkuus kasvaa (Pomeroy ja Brun 2001 s. 65). Tuloksista voidaankin havaita kuusivaltaisen metsän latvuspeittävyiden vaikutuksen latvuspidätyksen määrään olevan varsin maltillinen latvuspeittävyiden välillä 0 – 30 %, mutta latvuspidätystä tapahtuvan koko ajan. Kuusivaltaisessa metsässä latvuspidätys näyttää aavistuksen voimistuvan latvuspeittävyiden ylittäessä 40 %. Vastaavasti mäntyvaltaisessa sekä lehtipuuvaltaisessa metsässä latvuspidätyksen voimakkuus on varsin mitätöntä sekä mediaaniltaan, että keskiarvoltaan välillä 0 – 30 %. Mäntyvaltaisessa sekä lehtipuuvaltaisessa metsässä latvuspidätys näyttää aavistuksen kasvavan kun puuston latvuspeittävyys ylittää 50 %. Suhteellisen pienen otannan vuoksi tuloksista ei voi varmuudella havaita tilannetta, jossa latvuspidätys kasvaa niin suureksi, että oksien kantokyky pettää (Hedström ja Pomeroy 1998 s. 1612).



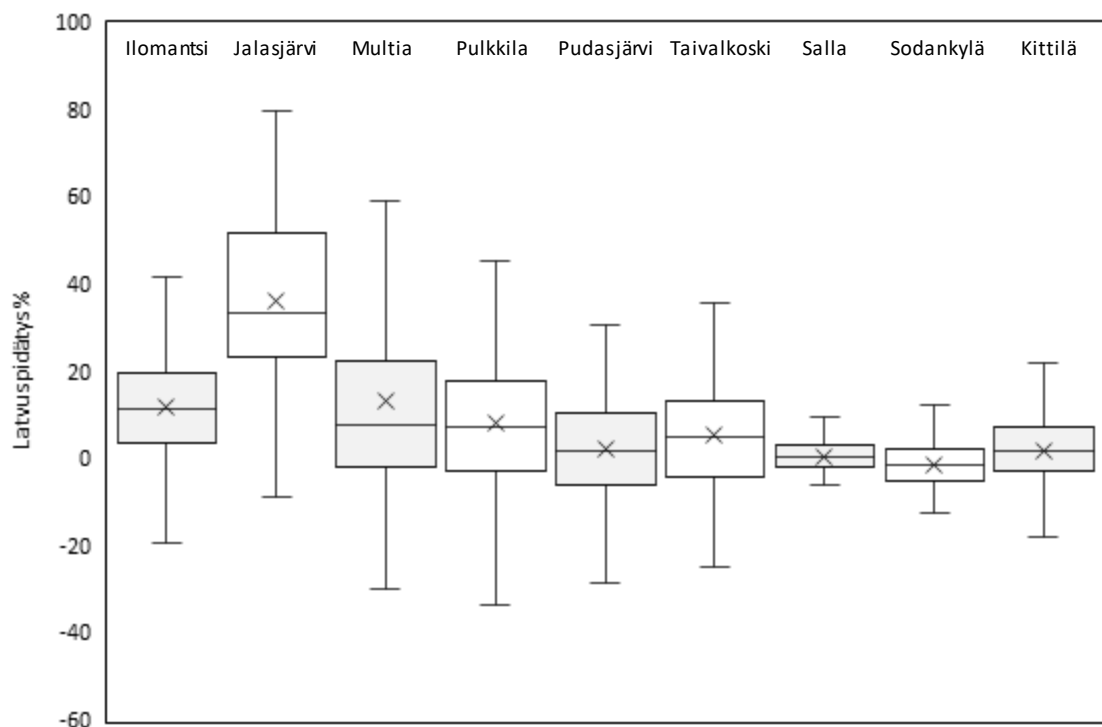
Kuva 8. Latvuspeittävyuden vaikutus latvuspidätykseen metsätyypeittäin. Merkintä X tarkoittaa havaintojen keskiarvoa. Kuvassa on yhdistetty kaikkien yhdeksän paikkakunnan latvuspidätyksen tiedot ja nämä tiedot on jaoteltu tasavälein metsätyypeittäin latvuspeittävyteen vaikutuksen havainnollistamiseksi. Vaalealla värityksellä on kuvattu kuusivaltaisen metsän tilanne, vaalean harmaalla värityksellä on kuvattu lehtipuuvaltaisen metsän tilanne sekä tummalla harmaalla on kuvattu mäntyvaltaisen metsän tilanne. Alapalkissa on kuvattu puuston latvuspeittävyuden vaihtelu 10 % tasavälein.

Latvuspidätykselle suoritettiin myös tilastollinen testaus varianssianalyysin (ANOVA) avulla. Testauksen tärkeimmät arvot on esitetty taulukossa 4. Testauksen perusteella latvuspidätys on merkittävästi poikkeavaa vertailtaessa metsätyyppejä toisiinsa eli $P < 0,05$. Testaus vahvistaa myös sen, että kuusivaltaisessa metsässä latvuspidätys on merkitsevää koko lumen kertymisen ajanjakson ajan. Vastaavasti mäntyvaltaisessa metsässä latvuspidätys näyttää olevan merkitsevää, kun latvuspidätys ylittää 30 %. Lehtipuuvaltaisessa metsässä vastaavaa merkitsevää muutosta latvuspidätyksessä ei näyttäisi tapahtuvan.

Taulukko 4. Latvuspeittävyiden ja latvuspäätöksen välinen tilastollinen testaus ja testauksen tärkeimmät arvot. Taulukon yläosassa on kuvattu, kuinka merkittävästi latvuspäätös muuttuu latvuspeittävyiden muuttuessa. Taulukon alaosassa on kuvattu, kuinka merkittävästi latvuspäätös eroaa arvosta 0 latvuspäätökseltään erilaisen latvuspeittävyiden omaavissa metsissä. Latvuspäätös on tilastollisesti merkitsevää, kun $P < 0,05$.

Latvuspeittävyiden tilastollisen vertailun tilanteet [%]	Kuusivaltainen metsä		Lehtipuuvaltainen metsä		Mäntyvaltainen metsä	
	(F)	(P)	(F)	(P)	(F)	(P)
1-10 % vs. 10-20 %	20,221	<0,001	7,456	0,008	0,480	0,489
10-20 % vs. 20-30 %	3,525	0,063	3,230	0,076	10,286	0,001
20-30 % vs. 30-40 %	2,820	0,095	2,135	0,146	4,571	0,033
30-40 % vs. 40-50 %	10,964	0,001	0,620	0,432	0,394	0,531
40-50 % vs. 50-60 %	8,424	0,004	37,382	<0,001	20,866	<0,001
50-60 % vs. 60-70 %	0,178	0,674	0,002	0,968	0,473	0,493
60-70 % vs. 70-80 %	7,819	0,008	-	-	0,203	0,654
0 vs. 1-10 %	46,845	<0,001	7,369	0,008	0,249	0,618
0 vs. 1-20 %	16,997	<0,001	2,403	0,123	0,023	0,881
0 vs. 1-30 %	29,574	<0,001	4,035	0,046	24,077	<0,001
0 vs. 1-40 %	75,787	<0,001	0,347	0,556	111,503	<0,001
0 vs. 1-50 %	125,024	<0,001	0,058	0,809	145,544	<0,001
0 vs. 1-60 %	221,902	<0,001	2,110	0,147	219,933	<0,001
0 vs. 1-70 %	254,321	<0,001	8,147	0,004	248,306	<0,001
0 vs. 1-80 %	273,266	<0,001	-	-	254,831	<0,001

Latvuspäätöstä tarkasteltiin myös paikkakuntaakohtaisesti (Kuva 9). Paikkakuntaakohtaisesti tarkasteltaessa latvuspäätös vaikuttaisi olevan voimakkainta eteläisillä lumilinjilla ja vähäisintä pohjoisilla lumilinjilla, eli latvuspäätös olisi voimakkaampaa Etelä-Suomessa kuin Pohjois-Suomessa. Myös Kuivalainen (2020 s. 48) havaitsi Etelä-Suomessa puuston latvustojen pidättävän vettä paremmin kuin Pohjois-Suomessa.



Kuva 9. Latvuspäättyksen voimakkuus ja vaihtelu paikkakunnittain. Merkinä X kuvaa keskiarvoa.

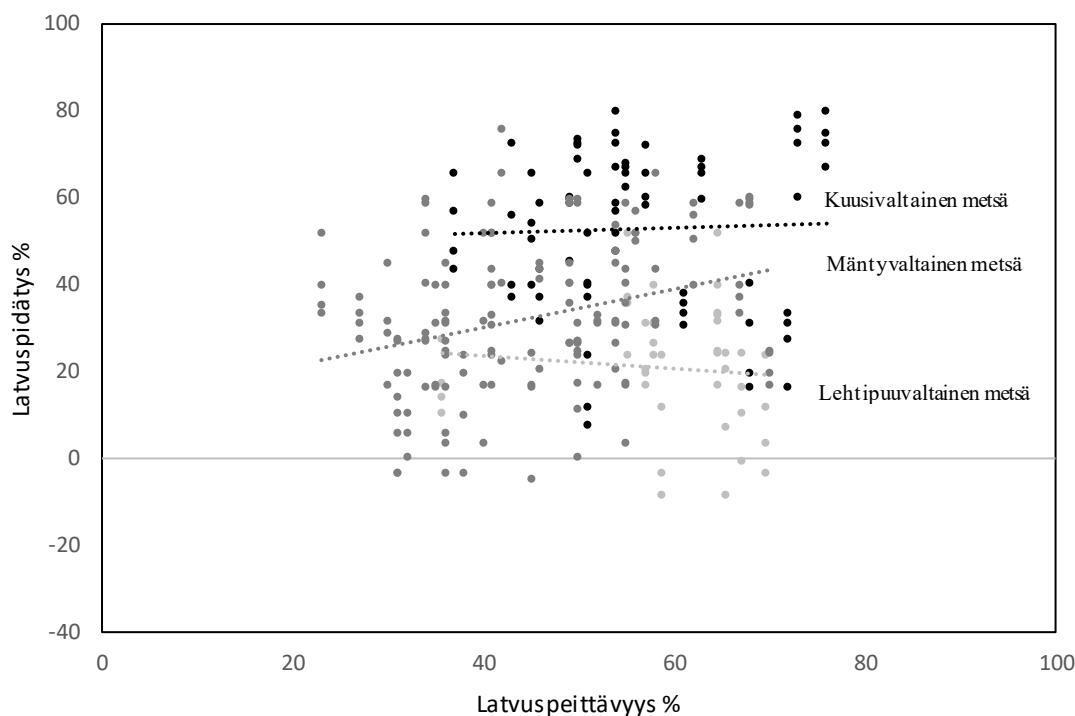
Tutkimuksen kohteissa (Taulukko 5) lumimäärä jakautuu siten, että eteläisillä lumilinjoilla lunta on vähemmän kuin pohjoisilla lumilinjoilla. Eteläisillä lumilinjoilla lumenmäärän erotus avoimen ja metsän välillä on myös suurempi. Suomessa lumimäärä kasvaa tasaisesti kuljettaessa Hangosta Värriön suuntaan (Oksanen 1999 s. 38) ja tämä Pohjois-Suomen suurempi lumimäärä sekä harvemmat metsät mahdollistavat lumen epätasaisemman jakautumisen. Lumen epätasainen jakautuminen saattaa johtua mm. tuulen vaikutuksesta (Kuusisto 1984 s. 30), joka saattaa kuljettaa lunta tai pudottaa lunta puuston oksilta. Harestad ja Bunell (1981 s. 855-856) havaitsivat, että latvuspeittävyuden merkitys lumen kertymiseen olisi vähäisempää alueilla, joissa lunta on enemmän kuin alueilla, joissa on vähemmän lunta. Tällöin sieppaus olisi suhteellisesti vähäisempää alueilla, joissa on paljon lunta. Tämä selittäisi eteläisten lumilinjojen paremman sieppauskyvyn verrattuna pohjoisiin lumilinjoin. Latvuston sieppaustehokkuuteen vaikuttaa lumisade ja lumisateesta kulunut aika latvuston tiheyden ohella. Myös kyky latvuspäättykseen heikkenee lumen määrän kasvaessa ja lumi saattaa oksan taipuessa pudota maahan, mikä voi myös aiheuttaa lumen epätasaista jakautumista metsän ja aukean välille (Hedström ja Pomeroy 1998 s. 1624). Eteläisillä lumilinjoilla tutkimuksen aikainen ilman keskilämpötila oli n. 2 astetta lämpimämpi kuin pohjoisilla lumilinjoilla.

(Ilmatieteenlaitos 2021). Alhaisempi keskilämpötila saattaisi myös osaltaan selittää eteläisten lumilinjojen suurempaa latvuspidätyksen voimakkuutta (Kozii ym. 2017 s. 3562-3563).

Taulukko 5. Lumen syvyys avoimilla alueilla ja metsissä paikkakunnittain

	Lumen syvyys aukealla, keskiarvo [m]	Lumen syvyys metsässä, keskiarvo [m]
Ilomantsi	0,56	0,52
Jalasjärvi	0,29	0,21
Multia	0,41	0,38
Pulkkila	0,31	0,30
Pudasjärvi	0,63	0,63
Taivalkoski	0,79	0,82
Salla	0,85	0,85
Sodankylä	0,85	0,85
Kittilä	0,90	0,87

Jalasjärven kohde poikkeaa kuitenkin selkeästi muista kohteista sillä lumimäärän ero aukean ja metsän välillä on isoin muihin kohteisiin verrattuna sekä lumen määrä on vähäisin muihin kohteisiin verrattuna. Lisäksi Jalasjärven kohteessa latvuspidätystä tapahtui huomattavasti enemmän muihin kohteisiin verrattuna. Kuvasta 10 on havaittavissa, että kuusivaltaisessa metsässä latvuspidätys on koko ajan varsin voimakasta. Mäntyvaltaisessa metsässä latvuspidätys näyttäisi kasvavan tasaisesti latvuspeittävyiden kasvaessa. Lehtipuuvaltaisessa metsässä latvuspidätys näyttäisi kääntyvän jopa tilanteeseen, jossa latvuspidätys heikkenee latvuspeittävyiden kasvaessa. Oksasen (1999 s. 58) mukaan Jalasjärven alue kuuluu lumiluokaltaan merelliseen ja ajoittaiseen lumiluokkaan ja ilmastotyyppiltään lauhan mantereen tai rannikon alueeseen yhdessä Pulkkilan lumilinjan kanssa. Jalasjärvi poikkeaa kuitenkin Pulkkilan kohteesta selkeästi tiheämmällä latvuspeittävyydellä, joka voi selittää myös Pulkkilan kohdetta suuremman latvuspidätyksen voimakkuuden. Kuitenkin vähäinen havaintomäärä paikkakuntaa kohti tekee latvuspidätyksen tulkinnan vaikeaksi ja siksi onkin suositeltavaa kasvattaa havaintomäärää tai tarkastella isoja kokonaisuuksia, joissa havaintoja on paljon. Muiden paikkakuntien latvuspidätyksen ja latvuspeittävyiden väliset taulukot on esitetty tutkimuksen liitteissä.



Kuva 10. Jalasjärven lumilinjan latvuspeittävyys ja latvuspidätys.

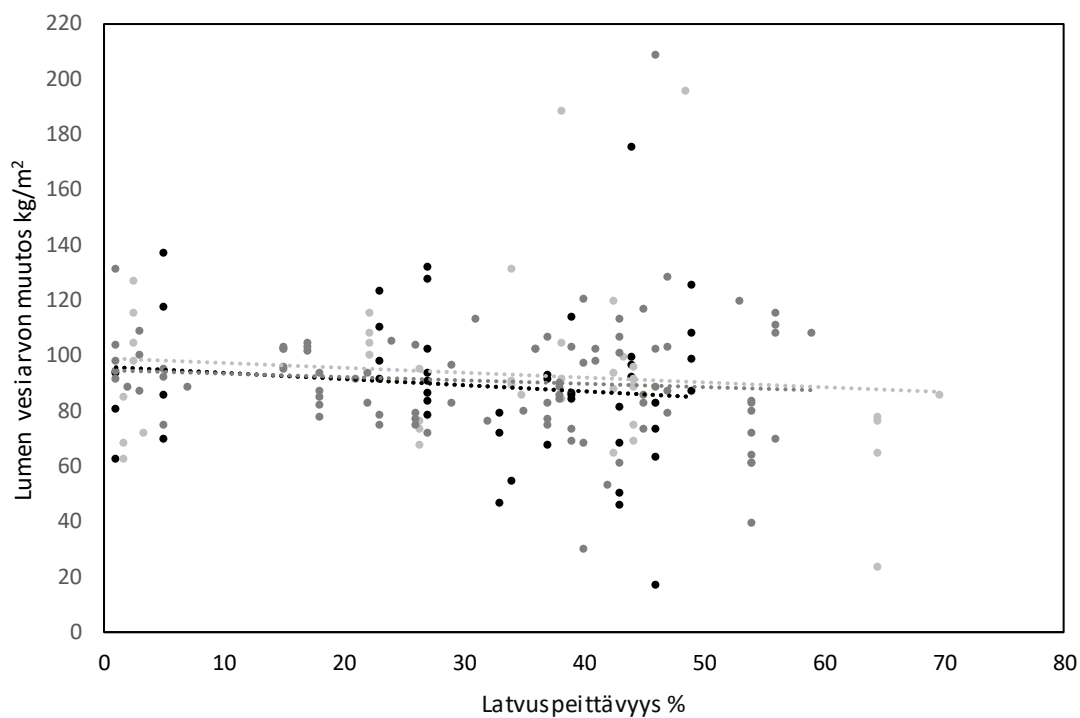
Kokonaisuudessaan tulokset latvuspidätyksestä vastaavat varsin hyvin ennakkokäsitystä, jonka mukaan kuusivaltainen metsä sieppaa lunta enemmän kuin mäntyvaltainen metsä ja mäntyvaltainen metsä sieppaa lunta enemmän kuin lehtipuuvaltainen metsä. Ennakkokäsityksen mukaan myös tiheämpi latvusto sieppaa enemmän lunta kuin harvempi latvusto ja tämäkin havaitaan tutkimuksessa. Myös eteläisillä lumilinjoilla latvuspidätys vaikuttaisi olevan hiukan suurempaa kuin pohjoisilla lumilinjoilla. Erityisesti kannattaa kiinnittää huomiota kattavaan havaintoaineistoon, sillä yksittäinen kohde vähäisellä havaintomäärällä ei kuvaa todellista tilannetta kovin hyvin ja voi siten vääristää tuloksia.

4.3 Latvuspeittävyiden vaikutus lumen vesi-arvoon

Lumen vesi-arvon muutos (kaava 4) on laskettu vertaamalla lumen vesi-arvoa metsässä suhteessa lumen vesi-arvojen keskiarvoon avoimella alueella eli lumen vesi-arvon muutos kertoo, kuinka paljon lumen vesi-arvo muuttuu latvuspeittävyiden kasvaessa. Tuloksista (kuva 11) voidaan havaita lumen vesi-arvon muutoksen latvuspeittävyiden kasvaessa olevan varsin saman suuntainen kuin aiemmissa tutkimuksissa (Kuusisto 1984 s. 36). Tämän tutkimuksen tulosten mukaan lumen vesi-arvo putoaa kuusivaltaisessa metsässä n.

12 kg/m² latvuspeittävyiden välillä 0 - 50 %. lehtipuuvaltaisessa metsässä lumen vesi-arvo putoaa n. 17 kg/m² latvuspeittävyiden välillä 0 – 70 %, kun mäntyvaltaisessa metsässä lumen vesi-arvo putoaa n. 12 kg/m² latvuspeittävyiden välillä 0 – 60 %. Keskimäärin lumen vesi-arvo putoaa siis 10 – 20 % metsän latvuspeittävyiden kasvaessa. Eli muutos lumen vesi-arvossa on varsin saman suuntainen, kun Kuusiston (1984 s. 36) tutkimuksessa, jonka mukaan lumen vesi-arvo on 10 – 20 % korkeampi metsän aukoilla, ja kuusivaltaisissa tiheissä metsissä vastaavasti 10 – 20 % alhaisempi kuin selkeillä avoimilla alueilla. Samoihin tuloksiin pääsi myös Moore (1997 s. 46), jonka mukaan tiheä metsä omaa matalamman lumen vesi-arvon kuin harvempi metsä. Lisäksi Duyar (2018 s. 9642) havaitsi vesi-arvon olevan suurempaa avoimilla alueilla (86 mm), kuin harvoissa metsissä (53mm) tai tiheissä metsissä (38 mm). Puuston läheisyydessä lumen vesi-arvo on matalampaa kuin kauempana puustosta (Pomeroy ja Brun 2001 s. 71) ja kauempana puustosta lumen syvyys kasvaa, mikä kasvattaa myös lumen vesi-arvoa (Pomeroy ja Gray 1995 s. 7). Toisin sanoen metsän tihentyessä myös lumen määrä vähenee ja siten myös vähenee lumen vesi-arvo tiheän puuston alla.

Tuloksista voi havaita myös lumen vesi-arvon olevan aavistuksen pienempää kuusivaltaisessa metsässä kuin mäntyvaltaisessa metsässä ja mäntyvaltaisen metsän lumen vesi-arvon taas aavistuksen pienempää kuin lehtipuuvaltaisen metsän. Myös Pomeroy ja Gray (1995 s. 30) havaitsivat tutkimuksessaan kuusivaltaisen metsän lumen vesi-arvon olevan pienempi kuin mäntyvaltaisen tai lehtipuuvaltaisen metsän. Kuusivaltaisessa metsässä lumen latvuspidätys on suurempaa kuin mäntyvaltaisessa tai lehtipuuvaltaisessa metsässä, joten puuston alla lumen määrä on myös vähäisempää. Lumen syvyys taas vaikuttaa lumen vesi-arvoon mikä saattaa näkyä kuusivaltaisen metsän pienempänä lumen vesi-arvona.



Kuva 11. Avoimien alueiden ja metsäisten alueiden lumen vesiarvon suhde puustoon latvuspeittävyteen eli kuinka paljon lumen vesiarvo muuttuu latvuspeittävyuden kasvaessa. Mustalla värillä on kuvattu kuusivaltainen metsä, tumman harmaalla värillä mäntyvaltainen metsä ja vaalean harmaalla värillä lehtipuuvaltainen metsä.

Lumen vesiarvolle suoritettiin myös tilastollinen testaus varianssianalyysin (ANOVA) avulla. Testauksen tärkeimmät arvot on esitetty taulukossa 6. Testauksen perusteella lumen vesiarvo ei poikkea merkittävästi, vaikka latvuspeittävyys muuttuisi. Myöskään metsätyypin muutoksella ei ole tilastollisesti merkitsevää vaikutusta lumen vesiarvoon.

Taulukko 6. Latvuspeittävyiden ja lumen vesiärvon välinen tilastollinen testaus ja testauksen tärkeimmät arvot. Taulukon yläosassa on kuvattu, kuinka merkittävästi lumen vesiärvon eroa arvosta 0 lumen vesiärvoltaan erilaisen latvuspeittävyiden omaavissa metsissä. Taulukon alaosassa on kuvattu, kuinka merkittävästi metsätyyppi vaikuttaa lumen vesiärvon. Lumen vesiärvon muutos on tilastollisesti merkitsevää, kun $P < 0,05$.

Latvuspeittävyiden tilastollisen vertailun tilanteet [%]	(F)	(P)
0 vs. 1-20 %	0,122	0,728
0 vs. 1-40 %	0,165	0,685
0 vs. 1-60 %	0,111	0,740
0 vs. 1-80 %	0,128	0,721
Metsätyyppien väliset tilastollisen vertailun tilanteet	(F)	(P)
Kuusivaltainen metsä vs. mäntyvaltainen metsä	0,196	0,659
Kuusivaltainen metsä vs. lehtipuuvaltainen metsä	0,512	0,476
Mäntyvaltainen metsä vs. lehtipuuvaltainen metsä	0,288	0,592

Kuusiston (1984 s. 36) mukaan lumen vesiärvon on suurempaa pohjoisessa kuin etelässä, mutta sitä ei voi havaita tässä tutkimuksessa. Tässä tutkimuksessa lumen vesiärvosta on yhteensä 180 kpl havaintoja ja nämä jakaantuvat siten, että kuusivaltaisesta metsästä on 46 havaintoa, lehtipuuvaltaisesta metsästä 42 havaintoa ja mäntyvaltaisesta metsästä 92 kpl. Tutkimuksessa on yhteensä 9 paikkakuntaa ja keskimäärin havaintoja paikkakunnittain on 20 kpl, joka ei ole riittävä määrä tarkasteltaessa lumen vesiärvon paikkakuntaakohtaisesti.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksessa georeferoitiin yhdeksän lumilinjakarttaa maantieteellisesti eri puolilla Suomea. Lumilinjakartat sisälsivät tiedon karkeasta lumilinjan sijainnista viivapiirroksena pohjakartalla. Mittauspisteiden 1 – 80 sijainti oli kuvailtu lumimittausten havaintolomakkeen tarkentaviin tietoihin ja näiden tietojen varassa mittauspisteet sijoitettiin kartalle, ja näin mittauspisteet saivat koordinaatit. Mittauspisteiden manuaalinen sijoittaminen osoittautui vaikeaksi ja tämän työvaiheen seurauksena tutkimuksen tuloksia voi pitää vain suuntaa antavina. Lumilinjojen alueille määritettiin avoimen laserkeilausaineiston perusteella arviot puuston latvuspeittävydestä. Latvuspeittävyden vaikutusta tarkasteltiin lumen latvuspidätykseen ja lumen vesiarvoon.

Aiemmat tutkimukset ovat osoittaneet laserkeilauksen olevan riittävän tarkka menetelmä puuston latvuspeittävyden arvioinnissa. Tutkimuksessa laserkeilauksen perusteella määritettyjen latvuspeittävyden arvojen vaihtelu oli suurempaa verrattuna muiden tietolähteiden tietoihin latvuspeittävydestä. Latvuspeittävyden arvot vaihtelivat myös alueellisesti eli eteläisillä alueilla latvuspeittävyden arvot olivat pääsääntöisesti suurempia kuin pohjoisilla alueilla. Toisaalta tämä vastasi Suomen metsien rakennetta eli metsä harvenee etelästä pohjoiseen kulkiessa. Kuitenkaan laserkeilauksen perusteella määritettyä latvuspeittävyden arvoa ei voitu osoittaa riittävän luotettavaksi, joten latvuspeittävyden arvoja on pidettävä myös suuntaa antavina.

Ennakkokäsityksen mukaisesti puuston latvuspidätys oli voimakkainta kuusivaltaisessa metsässä ennen mäntyvaltaista metsää ja mäntyvaltaisessa metsässä latvuspidätys oli voimakkaampaa kuin lehtipuuvaltaisessa metsässä. Kuusipuiden koko rungon kattava tiheä oksisto mahdollistaa suuremman latvuspidätyksen verrattuna mäntyihin ja koivuihin, mikä myös näkyi tutkimuksen tuloksissa. Tiheään oksistoon muodostuu lumen kertyessä oksien välisiä lumisiltoja, jotka kasvattavat lumen latvuspidätystä. Jokaisessa metsätyypissä latvuspidätys kasvoi latvuspeittävyden kasvaessa, mikä myös vastasi aiempia tutkimuksia. Kuusivaltaisessa metsässä latvuspidätys oli koko lumen kertymisen ajan tilastollisesti merkitsevää. Lehtipuuvaltaisessa metsässä latvuspidätys ei ollut missään vaiheessa tilastollisesti merkitsevää, kun mäntyvaltaisessa metsässä latvuspidätys muuttui merkitseväksi latvuspeittävyden ylitettyä 30 %. Latvuspidätys ei

osoittanut kuitenkin vahvaa riippuvuussuhdetta missään metsätyypissä ja todennäköisesti heikko riippuvuussuhde johtui laserkeilauksesta muodostetun latvuspeittävyuden ja lumen mittauspisteiden manuaalisen sijoittamisen luomista haasteista.

Lumen latvuspidätystä tarkasteltiin myös paikkakuntakohtaisesti. Aiempien tutkimusten mukaan lumen syvyys kasvaa etelästä pohjoiseen kulkiessa ja lumen latvuspidätyksen merkitevyys on suurempaa alueilla, joissa on vähemmän lunta. Myös lämpötilalla voi olla oma vaikutuksensa latvuspidätyksen voimakkuuteen alueellisessa tarkastelussa, jossa ilmeni juuri tämä eteläisen Suomen suurempi latvuspidätys verrattuna pohjoiseen Suomeen. Alueellinen tarkastelu paljasti myös suuren havaintoaineiston tärkeyden, sillä yksittäiset paikkakuntakohtaiset havainnot eivät kuvanneet tarpeeksi selvästi latvuspidätyksen muutosta.

Tiheän latvuspeittävyuden omaavat metsät pidättävät enemmän lunta ja lunta kertyy puuston alle siten vähemmän. Tutkimusten tulosten mukaan lumen vesiarvo väheni metsän tihentyessä, mikä vastaa aiempia tutkimuksia. Varianssianalyysin perusteella lumen vesiarvo ei kuitenkaan vähentynyt merkitsevästi, joten tulosta voidaan pitää muiden tulosten ohella vain suuntaa antavana. Kuusivaltaisissa metsissä lumen vesiarvo oli aavistuksen vähäisempää verrattuna mäntyvaltaiseen ja lehtipuuvaltaiseen metsään, mikä myös vastasi aiempia tutkimuksia.

Tutkimuksen tulokset vastasivat ennakkokäsityksiä eli 1) latvuspeittävyuden kasvaessa lumen latvuspidätys kasvaa. 2) Latvuspidätys ja latvuspidätyksen kasvu on voimakkainta kuusivaltaisissa metsissä ennen mäntyvaltaisia metsiä ja latvuspidätys on voimakkaampaa mäntyvaltaisissa metsissä kuin lehtipuuvaltaisissa metsissä. 3) Latvuspidätyksen havaittiin olevan voimakkaampaa eteläisessä Suomessa kuin pohjoisessa Suomessa. 4) Puuston latvuspeittävyuden kasvaessa lumen vesiarvo pieneni ja kuusivaltaisessa metsässä lumen vesiarvo oli aavistuksen vähäisempää muihin metsätyyppeihin verrattuna.

Tutkimuksessa yhdistettiin kesällä suoritettut laserkeilaukset sekä talven aikana suoritettut pitkien aikasarjojen lumilinjamittaukset. Uutuusarvoltaan tutkimus on siis varsin hyvä, koska vastaavia tutkimuksia ei ole tietojeni mukaan juurikaan tehty. Tutkimuksen

tulokset olivat myös odotettuja, joten todennäköisesti tulevaisuudessa luulisin tämänkaltaisten tutkimusten yleistyvän.

Tutkimuksen aikana ilmeni, että Suomen ympäristökeskus on julkaisemassa kasvillisuuden rakenteellisuusaineiston, joka pohjautuu laserkeilaukseen. Rakenteellisuusaineisto sisältää valtakunnallisesti tiedon puuston latvuspeittävydestä, mutta sisältää myös tiedot puuston pituudesta. Kasvillisuuden rakenteellisuusaineistoa ei ole vielä julkaistu avoimesti saataville, mutta julkaisun jälkeen suosittelen hyödyntämään tätä aineistoa tulevissa tutkimuksissa, joissa tarvitaan tietoa puuston latvuspeittävydestä. Latvuspeittävyden merkitsevyyden tietoa voidaan täydentää tiedolla puuston pituudesta, sillä etenkin kuusivaltaisissa metsissä puuston pituus on merkittävä latvuspidätyksen voimakkuuden kasvattaja. Laserkeilausaineisto mahdollistaa myös tarkat tiedot lumen mittauspaikkojen topologiasta, joka olisi myös hyvä lisä tuleviin tutkimuksiin.

Tutkimuksissa oli mukana yhdeksän lumilinjaa ja jokaiselta paikkakunnalta käsiteltiin lumitilanne neljän talven ajalta. Lumen mittauspisteiden tarkka sijainti on ensiarvoisen tärkeä jatkotutkimuksissa, sillä varmuus mittauspisteen sijainnista lisää tutkimuksen luotettavuutta. Paikkakunnittainen tarkastelu osoitti myös mittaushavaintojen määrän tärkeyden eli suosittelen jatkotutkimuksissa hyödyntämään mahdollisimman kattavaa aineistoa.

Ilmaston lämpenemisen seurauksena latvuspidätyksen määrä on kasvanut etenkin eteläisessä Suomessa. Pohjoisessa suomessa latvuspidätyksen ennustetaan kasvavan, mikäli ilmaston lämpenemistä ei pystytä pysäyttämään. Latvuspidätyksen rooli koko talven lumen kertymisestä on merkittävä ja kasvavalla lumen latvuspidätyksen voimakkuudella voi olla arvaamattomia vaikutuksia ympäristölle. Ilmastonmuutoksen myötä suosittelen kiinnittämään huomiota entistä enemmän lumitutkimukseen, sillä lumella on todella merkittävä rooli koko maailmanlaajuisessa veden hydrologisessa kierrossa.

6 YHTEENVETO

Diplomityön tavoitteena oli selvittää kuusivaltaisen metsän, mäntyvaltaisen metsän ja lehtipuuvaltaisen metsän latvuspidätyksen voimakkuutta latvuspeittävyiden kasvaessa. Tavoitteena oli myös, tutkia muuttuuko lumen vesi-arvo latvuspeittävyiden kasvaessa ja onko puustotyyppillä vaikutusta lumen vesi-arvon kehityksessä.

Tutkimus toteutettiin luomalla kirjallisuuden pohjalta lumilinjojen alueelle luotettava arvio latvuspeittävydestä hyödyntäen avointa laserkeilausaineistoa. Lumilinjamittausten perusteella saatua tietoa lumihavainnoista verrattiin latvuspeittävyiden määrään lumilinjojen alueella ja tutkimuksen tuloksista koostettiin erilaisia kuvaajia, joita verrattiin kirjallisuudesta saatuihin tuloksiin.

Tutkimuksen perusteella voidaan todeta kuusivaltaisen metsän latvuspidätyksen olevan voimakkaampaa kuin mäntyvaltaisen tai lehtipuuvaltaisen metsän ja mäntyvaltaisen metsän latvuspidätyksen olevan voimakkaampaa kuin lehtipuuvaltaisen metsän. Tutkimuksessa havaittiin myös kuusivaltaisen metsän latvuspidätyksen voimakkuuden eli latvuston kyvyn siepata satavaa lunta latvustoonsa kasvavan kaikista voimakkaimmin latvuspeittävyiden kasvaessa. Mäntyvaltaisessa metsässä latvuspidätyksen voimakkuus kasvaa myös latvuspeittävyiden kasvaessa, tosin ei yhtä voimakkaasti kuin kuusivaltaisessa metsässä. Myös lehtipuuvaltaisessa metsässä latvuspidätys kasvaa latvuspeittävyiden kasvaessa. Erot puulajien välillä johtuvat pääasiassa puuston rakenteellisista eroista. Tutkimuksessa havaittiin myös latvuspidätyksen olevan aavistuksen voimakkaampaa eteläisessä Suomessa kuin pohjoisessa Suomessa.

Lumen vesi-arvon osalta latvuspeittävyiden kasvaminen vähentää lumen vesi-arvoa. Metsätyypeillä ei näyttäisi olevan suurta vaikutusta lumen vesi-arvoon. Kuitenkin kuusivaltaisessa metsässä lumen vesi-arvo oli aavistuksen pienempää kuin muissa metsätyypeissä.

Tutkimuksessa lumimittaukset on suorittanut paikallinen lumilinjan havaitsija ja lumilinjan havaitsijan laatima kartta mittauspisteiden sijainnista voi aiheuttaa varsin suuren virhelähteen tutkimukseen. Myös itse mittajaan suorittama lumimittaus on voinut tapahtua virheellisesti tai lumihavainnon kirjauksessa on voinut tapahtua virhe.

Kuitenkaan tällä ei ole tutkimuksen kannalta niin suurta merkitystä kuin lumilinjan mittauspisteen sijainnin määrittämisellä kartalle ja tälle mittauspisteen sijainnille laserkeilaukseen perusteella määritetyllä latvuspeittävyuden arvolla.

Tutkimus oli uutuusarvoltaan varsin merkittävä, sillä tutkimuksia, joissa on yhdistetty dataa kesän ja talven ajalta ei ole julkaistu kovin usein. Tutkimuksen tuloksia voidaan pitää suurilta osin yleistä käsitystä noudattavina sekä tulokset ovat saman suuntaisia kuin aiemmissa tutkimuksissa. Puustojen tiheät latvustot sieppaavat lunta hyvin itseensä ja tämä siepattu lumi joko haihtuu talven aikana tai putoaa maahan. Kuitenkin talven aikana tiheään latvustoon saattaa kertyä lumikuormaa niin paljon, että puusto kärsii vaurioita taipumalla tai katkeamalla. Keväällä lumi alkaa sulaa, kun ympäristöstä tapahtuu lämmönsiirtymistä lumipeitteeseen. Myös topografia ja kasvillisuus sekä lumen tiheys, lämpötila ja albedo eli heijastavuus vaikuttavat lumen sulamiseen. Lumi sulaa ensin avoimilta alueilta ja viimeiseksi tiheistä metsistä. Osa lumesta haihtuu, mutta osa jää painanteisiin, osa imeytyy maahan ja osa siirtyy pintavaluntana eteenpäin. Sulava lumi saattaa aiheuttaa kevään tulvia ja siksi on tärkeää tunnistaa, kuinka metsäisen Suomen puusto käsittelee lunta. Lumi muodostaa suuren osan maailmanlaajuisista vesivarannoista ja ilmastomuutoksen myötä on entistä tärkeämpää kiinnittää huomiota lumitutkimuksiin.

LÄHTEET

Ahokas E., Sirkä O., Kareinen J., Pyysalo U., 2020. Kansallisen maastotietokannan laatumalli, ilmapistepilvi-laatuksikirja [verkkodokumentti]. Maanmittauslaitos. Saatavissa:

https://www.maanmittauslaitos.fi/sites/maanmittauslaitos.fi/files/attachments/2020/02/KMTK_ilmapistepilvi_laatuksikirja_2020-02-18.pdf [viitattu 31.3.2021]. 14 s.

Ahonen T., 2019. Kesäkeilauksen soveltuvuus korkeusmallin 2 m tuotantoon ja vaikutusten arviointi laatumalliin [verkkodokumentti]. Metropolia ammattikorkeakoulu, insinööritoimisto. Saatavissa:

https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/167939/Ahonen_Teppo.pdf?sequence=2 [viitattu 31.3.2021]. 30 s.

Anttila K., 2019. Seasonal snow surface roughness and albedo [verkkodokumentti]. Ilmatieteen Laitos. Saatavissa:

https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/301140/Kati_Anttila_thesis_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y [viitattu 31.3.2021]. 162 s.

Arumäe T., Lang M., 2017. Estimation of canopy cover in dense mixed-species forests using airborne lidar data [verkkodokumentti]. European Journal of Remote Sensing 51 (1). Saatavissa: <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/22797254.2017.1411169> [viitattu 31.3.2021]. 132-411 s.

Biemans H, Siderius C, Lutz A. F., Nepal S, Ahmad B, Hassan T, von Bloh W, Wijngaard R. R., Wester P, Shrestha A. B., Immerzeel W. W., 2019. Importance of snow and glacier meltwater for agriculture on the Indo-Gangetic Plain [verkkodokumentti]. Nature Sustainability 2 (7). Saatavissa:

http://eprints.lse.ac.uk/102562/2/UDlinks_final_for_publication_LSE.pdf [viitattu 4.11.2021]. 594-601 s.

Broström J., 2020. Lumen latvusintersektion ajallinen vaihtelu metsätyypeittäin Suomessa [verkkodokumentti]. Oulun yliopisto, Maantieteen tutkimusyksikkö, Pro gradu -tutkielma. Saatavissa: <http://jultika.oulu.fi/files/nbnfioulu-202006222622.pdf> [viitattu 31.3.2021]. 55 s.

Broxton P. D., Harpold A. A., Biederman J. A., Troch P. A., Molotch N. P., Brooks P. D., 2014. Quantifying the effects of vegetation structure on snow accumulation and ablation in mixed-conifer forests [verkkodokumentti]. *Ecohydrology* 8 (6). Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/266206219_Quantifying_the_effects_of_vegetation_structure_on_snow_accumulation_and_ablation_in_mixed-conifer_forests [viitattu 31.3.2021]. 1073-1094 s.

Canadian Forest Service, 2013. A best practices guide for generating forest inventory attributes from airborne laser scanning data using an area-based approach [verkkodokumentti]. Canadian Forest Service, Information Report FI-X-010. Saatavissa: <https://d1ied5glxfp8x8.cloudfront.net/pdfs/34887.pdf> [viitattu 31.3.2021]. 39 s.

Cohen J., Rind D., 1991. The Effect of Snow cover on the Climate [verkkodokumentti]. *Journal of Climate* 4 (7). Saatavissa: https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/4/7/1520-0442_1991_004_0689_teosco_2_0_co_2.xml [viitattu 4.11.2021]. 689-705 s.

Duperat M., Gardiner B., Ruel J-C., 2020. Wind and snow loading of balsam fir during a Canadian winter: A pioneer study [verkkodokumentti]. *Forests* 2020 11 (10). Saatavissa: https://www.mdpi.com/1999-4907/11/10/1089/htm#fig_body_display_forests-11-01089-f002 [viitattu 4.11.2021]. 15 s.

Duyar A, 2018. The effect of forest canopy cover and altitude on snow accumulation and melting in the upper watersheds [verkkodokumentti]. *Fresenius Environmental Bulletin* 27 (12B). Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/330010520_THE_EFFECTS_OF_FOREST_CANOPY_COVER_AND_ALTITUDE_ON_SNOW_ACCUMULATION_AND_MELTING_IN_THE_UPPER_WATERSHEDS [viitattu 31.3.2021]. 9642-9649 s.

Gregow H., Ruosteenoja K., Juga I., Näsman S., Mäkelä M., Laapas M., Jylhä K. 2011. Lumettoman maan routaolojen mallintaminen ja ennustettavuus muuttuvassa ilmastossa [verkkodokumentti]. Ilmatieteen laitos, raportteja 2011:5. Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/28455/2011nro5.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [viitattu 11.12.2021]. 45 s.

Grünwald T., Bühler Y., Lehning M., 2014. Elevation dependency of mountain snow depth [verkkodokumentti]. The Cryosphere 8. Saatavissa: <https://tc.copernicus.org/articles/8/2381/2014/tc-8-2381-2014.pdf> [viitattu 31.3.2021]. 2381-2394 s.

Hallikainen M., Jääskeläinen V., Koskinen J., Häme T., Perälä J., 1992. Application of ERS-1 AMI data to remote sensing of snow in Finland [verkkodokumentti]. Conference: IEEE 1992 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'92) At: Houston, TX, USA 3. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/263651893_Application_of_ERS-1_AMI_data_to_remote_sensing_of_snow_in_Finland [viitattu 4.11.2021]. 1661-1663 s.

Harestad A. S., Bunell F. L., 1981. Prediction of snow-water equivalents in coniferous forests [verkkodokumentti]. Canadian Journal of Forest Research 11 (4). Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/249532161_Prediction_of_snow-water_equivalent_in_coniferous_forests [viitattu 31.3.2021]. 854-857 s.

Hedström N. R., Pomeroy J. W., 1998. Measurements and modelling of snow interception in the boreal forest [verkkodokumentti]. Hydrological Processes 12 (10-11). Saatavissa: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/%28SICI%291099-1085%28199808/09%2912%3A10/11%3C1611%3A%3AAID-HYP684%3E3.0.CO%3B2-4> [viitattu 31.3.2021]. 1611-1625 s.

Heikkilä A., 2014. Metsän tiheyden vaikutus lumen määrään ja lumimallin parametrien arvoihin [verkkodokumentti]. Aalto-yliopisto. Saatavissa: https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/13528/master_Heikkil%c3%a4_Aleksi_2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y [viitattu 31.3.2021] 113 s.

Heikkilä R., 2008. Siltojen tuotemallintamisen ja rakentamisautomaation kehittäminen (5D-SILTA) – Tiehallinnon selvityksiä 22/2008 [verkkodokumentti]. Tiehallinto. Saatavissa: https://julkaisut.vayla.fi/sillat/julkaisut/5d-silta_raportti_2008.pdf [viitattu 31.3.2021]. 46 s.

Henttonen H. M., Nöjd P., Suvanto S., Heikkinen J., Mäkinen H., 2019. Size-class structure of the forests of Finland during 1921–2013: a recovery from centuries

of exploitation, guided by forest policies [verkkodokumentti]. *European Journal of Forest Research* 139. Saatavissa: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10342-019-01241-y> [viitattu 4.11.2021]. 279-293 s.

Hill A. F., Rittger K., Dendup T., Tshering D., Painter T. H., 2020. How Important Is Meltwater to the Chamkhar Chhu Headwaters of the Brahmaputra River? [verkkodokumentti]. *Frontiers in Earth Science*: 8 (21). Saatavissa: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2020.00081/full> [viitattu 4.11.2021]. 14 s.

Holopainen M., Hyypä J., Vastaranta M., 2013. Laserkeilaus metsävarojen hallinnassa [verkkodokumentti]. Helsingin yliopiston metsätieteiden laitoksen julkaisuja. Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/42935> [viitattu 31.3.2021]. 75 s.

Hopkinson C., Collins T., Anderson A., Pomeroy J., Spooner I., 2013. Spatial Snow Depth Assessment Using LiDAR Transect Samples and Public GIS Data Layers in the Elbow River Watershed, Alberta [verkkodokumentti]. *Canadian Water Resources Journal* 37 (2). Saatavissa: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.4296/cwrj3702893> [viitattu 31.3.2021]. 69-87 s.

Hopkinson C., Sitar M., Chasmer L., Treitz P., 2004. Mapping Snowpack Depth beneath Forest Canopies Using Airborne Lidar [verkkodokumentti]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 70 (3). Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/221960180_Mapping_Snowpack_Depth_beneath_Forest_Canopies_Using_Airborne_Lidar [viitattu 31.3.2021]. 323-330 s.

Hojatimalekshah A., Uhlmann Z., Glenn N. F., Hiemstra C. A., Tennant C. J., Graham J. D., Spaete L., Gelvin A., Marshall H-P., McNamara J. P., Enterkine J., 2021. Tree canopy and snow depth relationships at fine scales with terrestrial laser scanning [verkkodokumentti]. *The Cryosphere* 15. Saatavissa: <https://tc.copernicus.org/articles/15/2187/2021/tc-15-2187-2021.pdf> [viitattu 31.3.2021]. 2187-2209 s.

Hyypä H., Yu X., Hyypä J., Kaartinen H., Kaasalainen S., Honkavaara E., Rönholm P., 2004. Factors affecting the quality of DTM generation in forested areas

[verkkodokumentti]. ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop "Laser scanning 2005", Enschede, the Netherlands, September 12-14, 2005. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/228853407_Factors_Affecting_the_Quality_of_DTM_Generation_in_Forested_Areas [viitattu 31.3.2021]. 85-90 s.

Hyypä J., Hyypä H., Leckie D., Gougeon F., Yu X., Maltamo M., 2008. Review of methods of small-footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests [verkkodokumentti]. *International Journal of Remote Sensing* 29 (5). Saatavissa: <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/01431160701736489?needAccess=true> [viitattu 31.3.2021]. 1339-1366 s.

Hyypä J., Inkinen M., 1999. Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner [verkkodokumentti]. *The Photogrammetric Journal of Finland* 16 (2). Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/258707378_Detecting_and_estimating_attributes_for_single_trees_using_laser_scanner_Photo gramm_J_Finl [viitattu 31.3.2021]. 27-42 s.

Ilmatieteenlaitos 2021. Lämpötila- ja sadekarttoja vuodesta 1961. Ilmatieteenlaitos. Saatavissa: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/karttoja-vuodesta-1961> [viitattu 4.11.2021].

Ilmatieteenlaitos 2020. Talvien lumista ja lumisuudesta [verkkodokumentti]. Ilmatieteenlaitos. Saatavissa: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/lumitilastot> [viitattu 31.3.2021].

IPCC 2021. Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Basis. Contribution of Working Group 1 to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [verkkodokumentti]. Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., Connors S. L., Péan C., Berger S., Caud N., Chen Y., Goldfarb L., Gomis M. I., Huang M., Leitzell K., Lonnoy E., Matthews J. B. R., Maycock T. K., Waterfield T., Yelekçi O., Yu R., and Zhou B. Cambridge University Press. In Press. Saatavissa: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Citation.pdf [viitattu 11.12.2021]. 31 s.

Jenicek M., Pevna H., Matejka O., 2018. Canopy structure and topography effects on snow distribution at a catchment scale: Application of multivariate approaches [verkkodokumentti]. Journal of Hydrology and Hydromechanics 66 (1). Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/317350856_Canopy_structure_and_topography_effects_on_snow_distribution_at_a_catchment_scale_Application_of_multivariate_approaches [viitattu 31.3.2021]. 43-54 s.

Jones H. G., Pomeroy J. W., 1999. The Ecology of snow and Snow-covered Systems: Summary and Relevance to Wolf Creek, Yukon [verkkodokumentti]. Wolf Creek Research Basin: Hydrology, Ecology, Environment. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/255583133_The_Ecology_of_Snow_and_Snow-covered_Systems_Summary_and_Relevance_to_Wolf_Creek_Yukon [viitattu 4.11.2021]. 1-13 s.

Kamppila T., 2013. Laserkeilauksen luotettavuus taimikossa [verkkodokumentti]. Hämeen ammattikorkeakoulu, Metsätalouden koulutusohjelma. Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/65547/Kamppila_Tapio.pdf?sequence=1&isAllowed=y [viitattu 31.3.2021]. 43 s.

Kellomäki S., Leinonen S., 2005. Ekologinen kestävyys, ympäristönmuutos ja metsätalous. Metsäalan tulevaisuusfoorumin ympäristöryhmän loppuraportti [verkkodokumentti]. Joensuun yliopisto, Metsätieteellinen tiedekunta, Tiedonantoja 164. Saatavissa: <https://docplayer.fi/1927685-Ekologinen-kestavyys-ymparistonmuutos-ja-metsatalous-metsaalan-tulevaisuusfoorumin-ymparistoryhman-loppuraportti-seppokellomaki-ja-sanna-leinonen.html> [viitattu 11.12.2021]. 71 s.

Kirchner P. B., Bales R. C., Motoch N. P., Flanagan J., Guo Q., 2014. LiDAR measurement of seasonal snow accumulation along an elevation gradient in the southern Sierra Nevada, California [verkkodokumentti]. Hydrology and Earth System Sciences (HESS) 11 (5). Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/307697522_LiDAR_measurement_of_seasonal_snow_accumulation_along_an_elevation_gradient_in_the_southern_Sierra_Nevada_California [viitattu 31.3.2021]. 5327-5365 s.

Klöve B., 2019. Veden riittävyys on pitkälti ihmisen vastuulla [verkkodokumentti]. Oulun yliopisto, Jarno Mällinen. Saatavissa: <https://www oulu.fi/yliopisto/uutiset/veden-riittavyys> [viitattu 4.11.2021].

Koivisto S., Laulumaa V., 2012. Pistepilvessä – Metsien arkeologiset kohteet LiDAR-ilmalaserkeilausaineistoissa [verkkodokumentti]. Arkeologipäivät 2012. Saatavissa: http://www.sarks.fi/ap/ap2012/ap2012_10_koivisto_laulumaa.pdf [viitattu 31.3.2021]. 51-67 s.

Kokkila M., 2013. Ilmastonmuutoksen vaikutus puunkorjuun talvikauden korjuusoloihin hienojakoisella kivennäismaalla [verkkodokumentti]. Metsätieteen aikakauskirja 1 / 2013. Saatavissa: <https://www.metsatieteen aikakauskirja.fi/pdf/article6028.pdf> [viitattu 31.3.2021]. 5-18 s.

Komu H., Kivelä-Pelkonen L., Lumen ja jään hyödyntäminen matkailussa Suomessa ja muissa maissa [verkkodokumentti]. Työ- ja elinkeinoministeriö, TEM raportteja 10 / 2011. Saatavissa: https://mmm.fi/documents/1410837/1948019/Lumenjajaanmaa2012_interakt.pdf/eb4a8f7f-03d9-4e21-9c20-b41ba946fdce/Lumenjajaanmaa2012_interakt.pdf [viitattu 4.11.2021]. 357 s.

Korhonen K. T., Ihalainen A., Viiri H., Heikkinen J., Henttonen H. M., Hotanen J-P., Mäkelä H., Nevalainen S., Pitkänen J., 2013. Suomen metsät 2004-2008 ja niiden kehitys 1921-2008 [verkkodokumentti]. Metsätieteen aikakauskirja 3/2013. Saatavissa: <https://metsatieteen aikakauskirja.fi/pdf/article6025.pdf> [viitattu 31.3.2021]. 269-333 s.

Korhonen L., 2011a. Latvuspeittävyys, sen mittaaminen ja kansainvälinen metsän määritelmä. Metstätieteen aikakauskirja 4/2011. Saatavissa: <https://metsatieteen aikakauskirja.fi/pdf/article6815.pdf> [viitattu 31.3.2021]. 276-280 s.

Korhonen L., 2011b. Estimation of boreal forest canopy cover with ground measurements, statistical models and remote sensing [verkkodokumentti]. Dissertations Forestales. Saatavissa: <https://dissertationsforestales.fi/article/1898> [viitattu 31.3.2021]. 56 s.

Korhonen L., 2006. Havumetsän latvuspeiton mittaaminen ja ennustaminen puustotunnuksista [verkkodokumentti]. Joensuun yliopisto; Metsätieteellinen tiedekunta. Saatavissa: <http://forest.uef.fi/~lakorhon/latvuspeitto.pdf> [viitattu 31.3.2021]. 71 s.

Korpela I., Maltamo M., Ørka H., Tokola T., 2010. Tree Species Classification Using Airborne LiDAR - Effects of Stand and Tree Parameters, Downsizing of Training Set, Intensity Normalization, and Sensor Type [verkkodokumentti]. Silva Fennica 44 (2). Saatavissa:

https://www.researchgate.net/publication/228338798_Tree_Species_Classification_Using_Airborne_LiDAR_-_Effects_of_Stand_and_Tree_Parameters_Downsizing_of_Training_Set_Intensity_Normalization_and_Sensor_Type [viitattu 31.3.2021]. 319-339 s.

Kozii N., Laudon H., Löfvenius M., Hasselquist N., 2017. Increasing water losses from snow captured in the canopy of boreal forests: A case study using a 30 year data set [verkkodokumentti]. Hydrological Processes 31 (20). Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/318462139_Increasing_water_losses_from_snow_captured_in_the_canopy_of_boreal_forests_A_case_study_using_a_30_year_data_set [viitattu 4.11.2021]. 3558-3567 s.

Kuittinen R., 1992. Determination of snow water equivalents by using NOAA-satellite images, gamma ray spectrometry and field measurements [verkkodokumentti]. Technical Research Centre of Finland, Instrument Laboratory. Saatavissa: https://www.isprs.org/proceedings/XXVII/congress/part7/294_XXVII-part7.pdf [viitattu 4.11.2021]. 294-303 s.

Kuittinen R., 1979. Lumen vesiärvon mittaamisesta luonnon gammasäteilyn avulla [verkkodokumentti]. Vesihallitus – National board of waters, Finland. Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/25688/Vesihallitus%20Tiedotus%20185.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [viitattu 31.3.2021]. 51 s.

Kuivalainen M., 2020. ICP-metsäohjelman hydrologisen seuranta-aineiston analyysi [verkkodokumentti]. Oulun yliopisto, Teknillinen tiedekunta. Saatavissa: <http://jultika.oulu.fi/files/nbnfioulu-202006182487.pdf> [viitattu 31.3.2021]. 62 s.

Kuusisto E., 2008. Veden kierto – Hydrologinen palvelu Suomessa 1908-2008 [verkkodokumentti]. Suomen ympäristökeskus. Saatavissa: [https://www.syke.fi/fi-FI/Julkaisut/Erillisjulkaisut/Veden_kierto__Hydrologinen_palvelu_Suome\(1933](https://www.syke.fi/fi-FI/Julkaisut/Erillisjulkaisut/Veden_kierto__Hydrologinen_palvelu_Suome(1933) [viitattu 31.3.2021]. 183 s.

Kuusisto E., 1984. Snow accumulation and snowmelt in Finland [verkkodokumentti]. Vesihallitus, National Board of Waters. Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/31432/Vesientutkimuslaitoksen%20julkaisuja%2055.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [viitattu 31.3.2021]. 149 s.

Kuusisto E., 1973. Lumen sulamisesta ja sulamiskauden vesitaseesta lammin pääjärvellä 1970-72 [verkkodokumentti]. Vesihallitus, National Board of Waters. Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/25720/Vesihallitus%20Tiedotus%2046.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [viitattu 31.3.2021]. 121 s.

Lehtonen I., Venäläinen A., Gregow H., 2020. Ilmastomuutoksen vaikutukset Suomen metsänhoidon näkökulmasta [verkkodokumentti]. Ilmatieteen laitos, Raportteja 2020:5. Saatavissa: https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/319348/Lehtonen_Ilmastomuutoksen_vaiikutukset_raportti_2020_5.pdf?sequence=1&isAllowed=y [viitattu 4.11.2021]. 41 s.

Leppäranta M., Virta J., Huttula T., 2017. Hydrologian perusteet [verkkodokumentti]. Helsingin yliopisto, Fysiikan laitos. Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/241220/Hydrologian%20perusteet.pdf?sequence=12&isAllowed=y> [viitattu 31.3.2021]. 223 s.

Liikennevirasto, 2011. Tie- ja ratahankkeiden maastotiedot, Mittausohje [verkkodokumentti]. Liikennevirasto. Saatavissa: https://julkaisut.vayla.fi/pdf3/lo_2011-18_tie-ja_ratahankkeiden_web.pdf [viitattu 31.3.2021]. 28 s.

López-Moreno J. I., Revuelto J., Gilaberte M., Morán-Tejeda E., Pons M., Jover E., Esteban P., García C., Pomeroy J. W., 2013. The effect of slope aspect on the response of snowpack to climate warming in the Pyrenees [verkkodokumentti]. Theoretical and Applied Climatology 117 (1-2). Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/260668183_The_effect_of_slope_aspect_on_t

he_response_of_snowpack_to_climate_warming_in_the_Pyrenees [viitattu 31.3.2021].
14 s.

Lundberg A., Koivusalo H., 2003. Estimating winter evaporation in boreal forests with operational snow course data [verkkodokumentti]. Hydrological Processes 17 (8). Saatavissa: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/hyp.1179> [viitattu 31.3.2021]. 1479-1493 s.

Luonnonvarakeskus. Monilähteisen valtakunnan metsien inventoinnin (MVMI) kartta-aineisto 2017. Luonnonvarakeskus - aineistonlatauspalvelu. Saatavissa: <http://kartta.luke.fi/opendata/valinta.html> [viitattu 31.3.2021].

Maanmittauslaitos 2021. Laserkeilaus ja ilmakuvaukset [verkkodokumentti]. Maanmittauslaitos. Saatavissa: <https://www.maanmittauslaitos.fi/laserkeilaus-ja-ilmakuvaus> [viitattu 31.3.2021].

Maanmittauslaitos. Taustakarttasarja, Laserkeilausaineisto. Maanmittauslaitos – Avoimien aineistojen tiedostopalvelu. Saatavissa: <https://tiedostopalvelu.maanmittauslaitos.fi/tp/kartta> [viitattu 4.11.2021].

Mahat V., Tarboton D. G., 2014. Representation of canopy snow interception, unloading and melt in a parsimonious snowmelt model [verkkodokumentti]. Hydrological processes 28 (26). Saatavissa: <https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1157&context=docdan> [viitattu 31.3.2021]. 6320-6336 s.

Maltamo M., Packalén P., Uutera J., Äärölä E., Heikkilä J., 2008. Laserkeilaustulkinnan hyödyntäminen metsäsuunnittelun tietolähteenä [verkkodokumentti]. Metsätieteen aikakauskirja 4/2008. Saatavissa: <http://www.metla.fi/aikakauskirja/full/ff08/ff084304.pdf> [viitattu 31.3.2021]. 304-309 s.

Mikkonen S., Laine M., Mäkelä H. M., Gregow H., Tuomenvirta H., Lahtinen M., Laaksonen A., 2015. Trends in the average temperature in Finland, 1847-2013 [verkkodokumentti]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment 29.

Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1007/s00477-014-0992-2> [viitattu 31.3.2021]. 1521-1529 s.

Meløysund V., Leira V., Høiseth K. V., Lisø K. R., 2007. Predicting snow density using meteorological data [verkkodokumentti]. *Meteorological Applications* 14 (4). Saatavissa: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/met.40> [viitattu 31.3.2021]. 413-423 s.

Metsäkeskus 2021. Tietotuotekuvaus Hila-aineisto [verkkodokumentti]. Suomen metsäkeskus. Saatavissa: <https://www.metsakeskus.fi/sites/default/files/document/tietotuotekuvaus-hila-aineisto.pdf> [viitattu 31.3.2021]. 2 s.

Metsäkeskus. Hila-aineistot. Metsäkeskus - Paikkatietoaineistot. Saatavissa: <https://www.metsakeskus.fi/fi/avoim-metsa-ja-luontotieto/aineistot-paikkatieto-ohjelmille/paikkatietoaineistot> [viitattu 4.11.2021].

Moeser D., Stähli M., Jonas T., 2015. Improved snow interception modeling using canopy parameters derived from airborne LiDAR data [verkkodokumentti]. *Water Resources Research* 51 (7). Saatavissa: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2014WR016724> [viitattu 31.3.2021]. 5041-5059 s.

Moisander M., 2014. Kaukokartoitus lumen vesiarvon seurannan tukena [verkkodokumentti]. Aalto-yliopiston insinööritieteiden korkeakoulu. Saatavissa: https://aaltdoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/13500/master_Moisander_Mikko_2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y [viitattu 4.11.2021]. 75 s.

Moore C. A., 1997. Snow accumulation under various successional stages of lodgepole pine [verkkodokumentti]. Montana State University – Bozeman. Saatavissa: <https://scholarworks.montana.edu/xmlui/bitstream/handle/1/7469/31762102365036.pdf?sequence=1> [viitattu 31.3.2021]. 92 s.

Motiva, 2021. Vesivoima [verkkodokumentti]. Motiva, uusiutuva energia. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/vesivoima [viitattu 4.11.2021].

Mott R., Vionnet V., Grünwald T., 2013. The Seasonal Snow Cover Dynamics: Review on Wind-Driven Coupling Processes [verkkodokumentti]. *Frontiers in Earth Science* 6 (197). Saatavissa: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2018.00197/full> [viitattu 31.3.2021]. 25 s.

Naesset E., 2002. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data [verkkodokumentti]. *Remote Sensing of Environment* 80 (1). Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425701002905> [viitattu 31.3.2021]. 88-99 s.

Naesset E., 2004. Practical Large-scale Forest Stand Inventory Using a Small-Footprint Airborne Scanning Laser [verkkodokumentti]. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19 (2). Saatavissa: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02827580310019257> [viitattu 31.3.2021]. 164-179 s.

Naesset E., 2009. Effects of different sensors, flying altitudes, and pulse repetition frequencies on forest canopy metrics and biophysical stand properties derived from small-footprint airborne laser data [verkkodokumentti]. *Remote Sensing of Environment* 113 (1). Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425708002691> [viitattu 31.3.2021]. 148-159 s.

Nolin A. W., 2010. Recent advances in remote sensing of seasonal snow [verkkodokumentti]. *Journal of Glaciology* 56 (200). Saatavissa: <https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-glaciology/article/recent-advances-in-remote-sensing-of-seasonal-snow/FFAC5B88D4480213436D6617A5ED208F> [viitattu 4.11.2021]. 1141-1150 s.

Oki T., Kanae S., 2006. Global hydrological cycles and world resources [verkkodokumentti]. *Science* 313 (5790). Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/6856186_Global_Hydrological_Cycles_and_World_Water_Resources [viitattu 31.3.2021]. 1068-1072 s.

Oksanen T., 1999. Suomen lumipeitteen alueellinen vaihtelu [verkkodokumentti]. Pro gradu-tutkielma, Geofysiikan laitos, Helsingin yliopisto. Saatavissa:

<https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/20966/suomenlu.pdf?sequence=1>
[viitattu 31.3.2021]. 70 s.

Parjanne A., Rytönen A-M., Veijalainen N., 2020. Ilmastonmuutoksen ja vesienhoidon huomioon ottaminen tulvariskien hallinnassa [verkkodokumentti]. Ympäristöhallinto. Saatavissa: <https://www.ymparisto.fi/download/noname/%7BBBDABB7C-C44B-45B6-BDAE-BECF7DD05087%7D/157142> [viitattu 11.12.2021]. 78 s.

Perälä J., Reuna M., 1990. Lumen vesiärvon alueellinen ja ajallinen vaihtelu Suomessa [verkkodokumentti]. Vesi- ja ympäristöhallitus. Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/182627> [viitattu 31.3.2021]. 262 s.

Pomeroy J. W., Brun E., 2001. Physical properties of snow. [verkkodokumentti]. Snow ecology Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/252454769_Snow_Ecology [viitattu 31.3.2021]. 45-126 s.

Pomeroy J. W., Parviainen J., Hedström N., Gray D. M., 1998. Coupled modelling of forest snow interception and sublimation [verkkodokumentti]. Hydrological Processes 15 (12). Saatavissa: <https://onlinelibrary.wiley.com/pomeroy/doi/abs/10.1002/%28SICI%291099-1085%28199812%2912%3A15%3C2317%3A%3AAID-HYP799%3E3.0.CO%3B2-X> [viitattu 31.3.2021]. 2317-2337 s.

Pomeroy J. W., Gray D. M., 1995. Snowcover accumulation, relocation and management [verkkodokumentti]. National Hydrology Research Institute Science Report No. 7. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/311929989_Snow_Accumulation_Relocation_and_Management_National_Hydrology_Research_Institute_Science_Report_No_7 [viitattu 31.3.2021]. 135 s.

Poutanen P., 2017. Laserkeilaus arkkitehtisuunnittelussa [verkkodokumentti]. BST-Arkkitehdit Oy. Saatavissa: <https://prodigious.tamk.fi/files/2017/05/Laserkeilaus-arkkitehtisuunnittelussa-Pietari-Poutanen.pdf> [viitattu 31.3.2021]. 15 s.

Rasmus S. 2005. Snow pack structure characteristics in Finland – Measurements and Modelling [verkkodokumentti]. University of Helsinki, Division of Geophysics, Report series in Geophysics: 48. Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/23226/snowpack.pdf?sequence=2> [viitattu 31.10.2021]. 238 s.

Rikkinen A., Sillanpää E., 2019. Projekti Sturmbock – Lapin sodan suurimman puolustuslinjan kartoitustutkimus [verkkodokumentti]. Raito, Maakunnallinen museolehti. Saatavissa: <https://docplayer.fi/172413506-Lukijalle-1-hannu-kotivuori-raito-projekti-sturmbock-lapin-sodan-suurimman-puolustuslinjan-kartoitustutkimus-3-aleksi-rikkinen-emil-sillanpaa.html> [viitattu 31.3.2021]. 52 s.

Robinson D. A., Dewey K. F., Heim R. R., 1993. Global Snow Cover Monitoring: An Update [verkkodokumentti]. Bulletin of the American Meteorological Society 74 (9). Saatavissa: https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/74/9/1520-0477_1993_074_1689_gscmau_2_0_co_2.xml [viitattu 4.11.2021]. 1689-1696 s.

Ruosteenoja K., Räisänen J., Venäläinen A., Kämäräinen M., Pirinen P., 2016. Terminen kasvukausi lämpenevässä ilmastossa [verkkodokumentti]. Terra 128 (1). Saatavissa: <https://docplayer.fi/107126875-Terminen-kasvukausi-lampenevassa-ilmastossa.html> [viitattu 11.12.2021]. 3-15 s.

Ruosteenoja K., 2014. Ilmastonmuutos v. 2013: Luonnontieteellinen perusta; Yhteenveto päätöksentekijöille Suomeksi. Ensimmäisen työryhmän osuus IPCC:n 5. arviointiraportissa [verkkodokumentti]. Ilmatieteen laitos. Saatavissa: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/documents/30106/42362/ipcc5-yhteenveto-suomennos.pdf/4332dffb-da72-41c9-a23d-24215c5cbbac> [viitattu 31.3.2021]. 35 s.

Sicart J. E., Essery R. L., Pomeroy J. W., Hardy J., Link T., Marks D., 2004. A sensitivity study of daytime net radiation during snowmelt to forest canopy and atmospheric conditions [verkkodokumentti]. Journal of Hydrometeorology 5 (5). Saatavissa: https://journals.ametsoc.org/view/journals/hydr/5/5/1525-7541_2004_005_0774_assodn_2_0_co_2.xml [viitattu 31.3.2021]. 774-784 s.

Siipilehto J., Lindeman H., Vastaranta M., Yu X., Uusitalo J., 2016. Reliability of the predicted stand structure for clear-cut stands using optional methods: airborne laser scanning-based methods, smartphone-based forest inventory application Trestima and pre-harvest measurement tool EMO [verkkodokumentti]. Silva Fennica 50 (3). Saatavissa: <https://silvafennica.fi/article/1568> [viitattu 31.3.2021]. 24 s.

Suhonen V., Rantakokko K., 2006. Vantaajoen tulvatorjunnan toimintasuunnitelma [verkkodokumentti]. Uudenmaan ympäristökeskuksen raportteja 1-2006. Saatavissa: https://www.hel.fi/hel2/hkr/julkaisut/ohjeet/aluesuunnitelman_lahtoaaineisto/vantaanjoen_tulvatorjunta_suunnitelma.pdf [viitattu 31.3.2021]. 115 s.

Suvanto A., Maltamo M., Packalen P., Kangas J., 2005. Kuviokohtaisten puustotunnusten ennustaminen laserkeilauksella [verkkodokumentti]. Metsätieteen aikakauskirja 4/2005. Saatavissa: <https://metsatieteen aikakauskirja.fi/pdf/article6138.pdf> [viitattu 31.3.2021]. 413-328 s.

SYKE 2011. Puuston rakenteellisuusaineiston tietoseloste [verkkodokumentti]. Suomen ympäristökeskus. Saatavissa: http://geoportal.ymparisto.fi/meta/julkinen/dokumentit/Kasvillisuuden_rakenteellisuus_aineistot.pdf [viitattu 31.3.2021]. 18 s.

SYKE 2020. Laserkeilaus vesien hallinnassa osana kestävästä maankäytöstä ja metsien suunnittelua (LaserVesi) [verkkodokumentti]. Suomen ympäristökeskus. Saatavissa: <https://www.syke.fi/hankkeet/laservesi> [viitattu 31.3.2021].

SYKE 2021. Puuston rakenteellisuusaineiston tietosisältö [verkkodokumentti]. Suomen ympäristökeskus. Saatavissa: http://geoportal.ymparisto.fi/meta/julkinen/dokumentit/Kasvillisuuden_rakenteellisuus_aineistot.pdf [viitattu 31.3.2021]. 18 s.

Takeda H., 2004. Ground surface estimation in dense forest [verkkodokumentti]. Spatial Surveying Department, Kokusai Kogyo Co., Ltd. Saatavissa: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.184.1937&rep=rep1&type=pdf> [viitattu 31.3.2021]. 8 s.

Teitto T., 2012. Laserkeilaus suunnittelun apuvälineenä [verkkodokumentti]. Kymenlaakson ammattikorkeakoulu. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/45108/Teitto%20Opinnaytettyo.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [31.3.2021]. 30 s.

Twedt DJ., Ayala A., Shickel M., 2015. Leaf-On Canopy Closure in Broadleaf Deciduous Forests Predicted during Winter [verkkodokumentti]. Forest Science 61 (5). Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/281844093_Leaf-On_Canopy_Closure_in_Broadleaf_Deciduous_Forests_Predicted_during_Winter [viitattu 31.3.2021]. 921-931 s.

Varhola A., Coops N. C., Bater C. W., Teti P., Boon S., Weiler M., 2010. The influence of ground- and lidar-derived forest structure metrics on snow accumulation and ablation in disturbed forests [verkkodokumentti]. Canadian Journal of Forest Research 40 (4). Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/237151793_The_influence_of_ground-_and_lidar-_derived_forest_structure_metrics_on_snow_accumulation_and_ablation_in_disturbed_forests [viitattu 31.3.2021]. 812-821 s.

Vastaranta M., Korpela I., Uotila A., Hovi A., Holopainen M., 2011. Mapping of snow-damaged trees in bitemporal airborne lidar data [verkkodokumentti]. European Journal of Forest Research 131 (4). Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/257496614_Mapping_of_snow-damaged_trees_based_on_bitemporal_airborne_LiDAR_data/link/5876266a08aebf17d3b970f9/download [viitattu 31.3.2021]. 16 s.

Venäläinen A., Lehtonen I., Laapas M., Ruosteenoja K., Tikkanen O.-P., Viiri H., Ikonen V.-P., Peltola H. 2020. Ilmastonmuutos lisää metsätuhojen riskejä Suomessa [verkkodokumentti]. Metsätieteen aikakauskirja 2020-10454. Tieteen tori. Saatavissa: <https://metsatieteen aikakauskirja.fi/pdf/article10454.pdf> [viitattu 11.12.2021]. 9 s.

Vesivarat ryhmä – SYKE, 2020. Hydrologisen seurannan kenttätöiden toimintakäsikirja [verkkodokumentti]. Suomen ympäristökeskus SYKE. Saatavissa:

https://www.ymparisto.fi/fi-fi/kartat_ja_tilastot/hydrologiset_havainnot [viitattu 31.3.2021]. 99 s.

Vilhomaa J., Laaksonen H., 2011. Valtakunnallinen laserkeilaus – Testityöstä tuotantoon [verkkodokumentti]. The Photogrammetric Journal of Finland 22 (3). Saatavissa: https://foto.aalto.fi/seura/julkaisut/pjf/pjf_e/2011/PJF2011_3_Vilhomaa_Laaksonen.pdf [viitattu 31.3.2021]. 82-91 s.

Winkler D. E., Butz R. J., Germino M. J., Reinhardt K., Kueppers L. M., 2018. Snowmelt Timing Regulates Community Composition, Phenology and Physiological Performance of Alpine Plants [verkkodokumentti]. Frontiers in Plant Science 9 (13). Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/326698597_Snowmelt_Timing_Regulates_Community_Composition_Phenology_and_Physiological_Performance_of_Alpine_Plants [viitattu 4.11.2021]. 13 s.

Woods M., Pitt D., Penner M., Lim K., Nesbitt D., Etheridge D., Treitz P., 2011. Operational implementation of a LiDAR inventory in Boreal Ontario [verkkodokumentti]. Forestry Chronicle 87 (4). Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/229077834_Operational_implementation_of_a_LiDAR_inventory_in_Boreal_Ontario [viitattu 31.3.2021]. 512-528 s.

Xiao Y., Li X., Zhao S., Song G., 2019. Characteristics and simulation of snow interception by the canopy of primary spruce-fir Korean pine forests in the Xiaoxing'an Mountains of China [verkkodokumentti]. Ecology and evolution 9 (10). Saatavissa: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6540713/> [viitattu 31.3.2021]. 5694-5707 s.

Ympäristöhallinto 2004. Kaukokartoituksen tietopaketti [verkkodokumentti]. Ympäristöhallinto. Saatavissa: [http://www.i4.ymparisto.fi/i4/fin/tuotteet/Kaukokartoituksen_tietopaketti_\(2004\).pdf](http://www.i4.ymparisto.fi/i4/fin/tuotteet/Kaukokartoituksen_tietopaketti_(2004).pdf) [viitattu 4.11.2021]. 13 s.

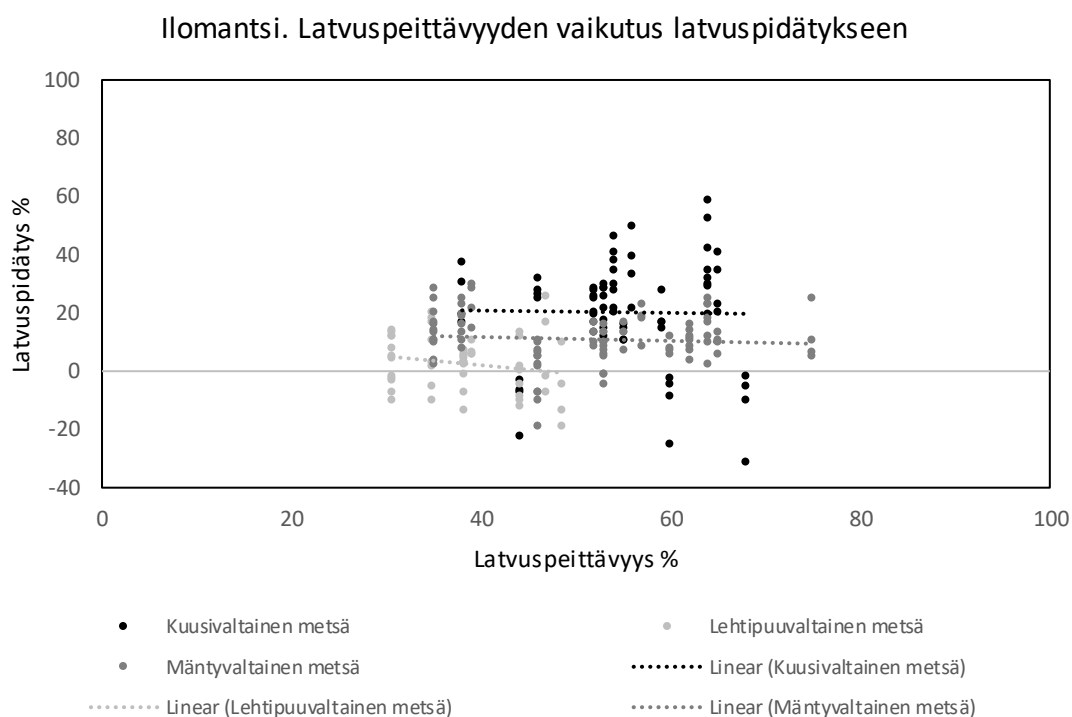
Yrttimaa T., Riihimäki H., 2018. ALS-piirteet [verkkodokumentti]. Metsävarojen kartoitus Hyttiälässä. Saatavissa:

<https://www.mv.helsinki.fi/home/korpela/FOR254/html/als-piirteet.html>
31.3.2021].

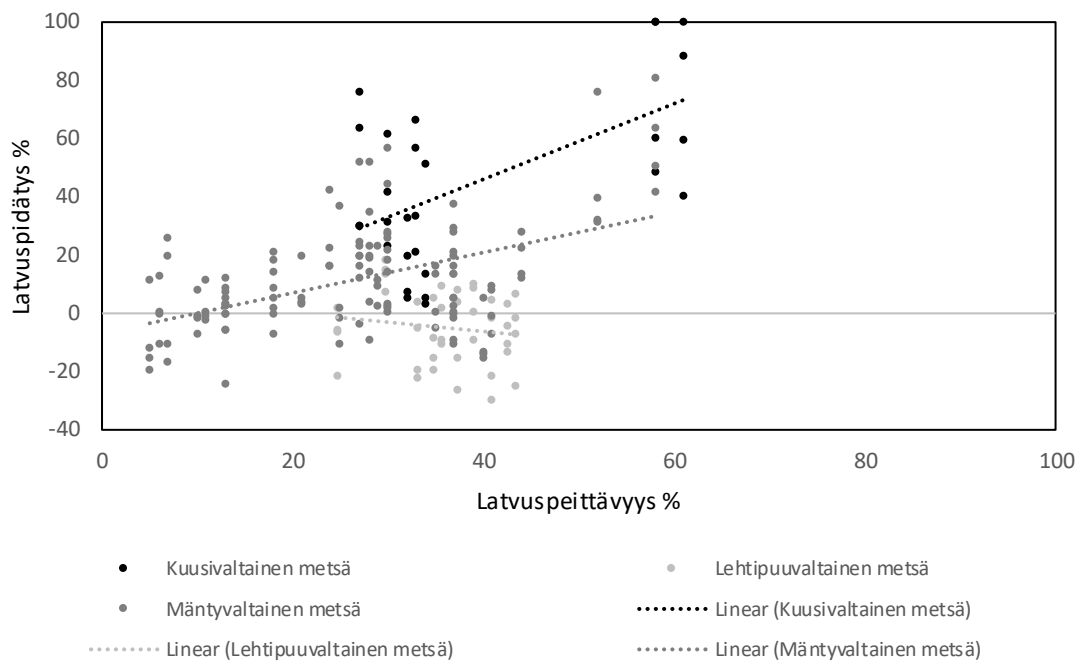
[viitattu

LIITTEET

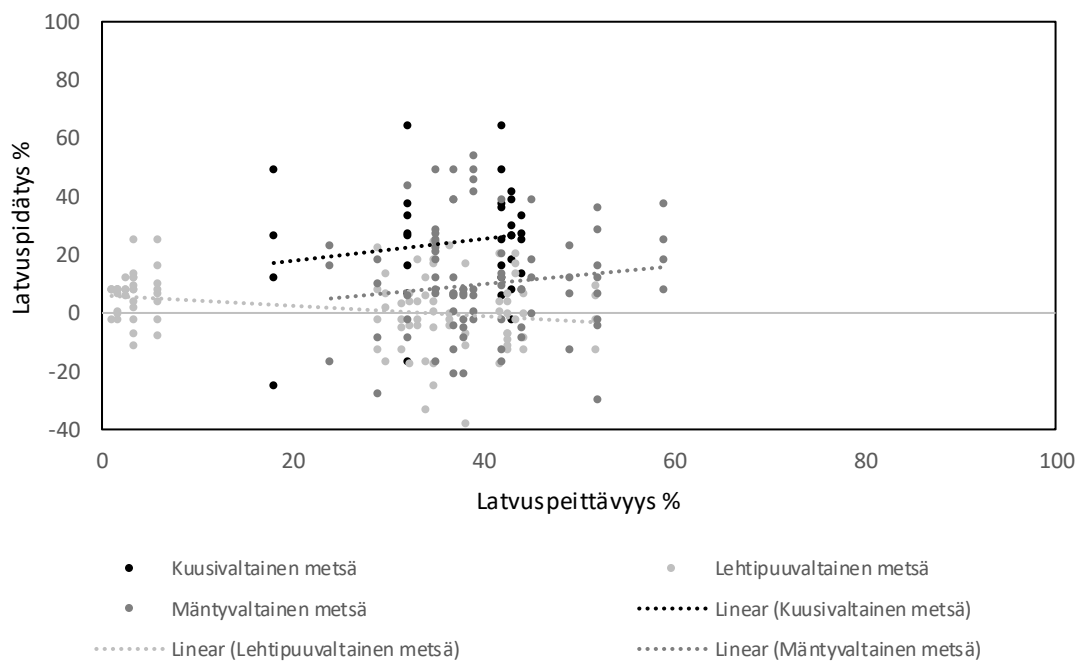
Liite 1. Latvuspeittävyden vaikutus latvuspikätykseen paikkakunnittain järjestyksessä; Ilomantsi, Multia, Pulkki, Pudasjärvi, Taivalkoski, Salla, Sodankylä, Kittilä. Kuvioissa latvuspikätykset (-40 – 100 %) on ilmoitettu X-akselilla ja latvuspeittävyys (0-100 %) on ilmoitettu Y-akselilla.



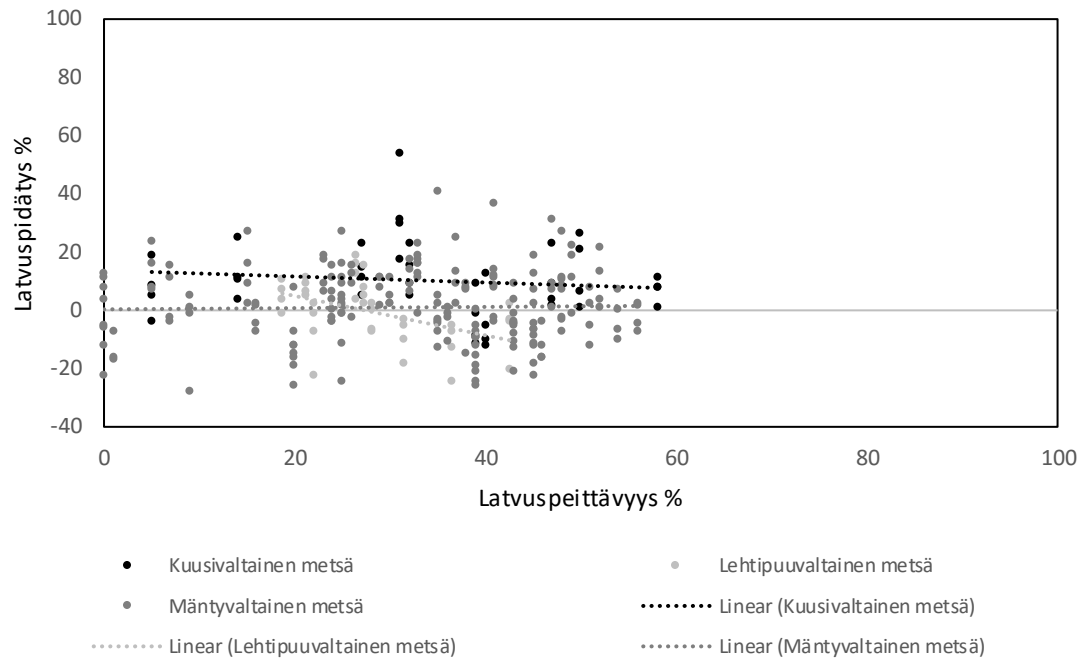
Multia. Latvuspeittävyden vaikutus latvuspidätykseen



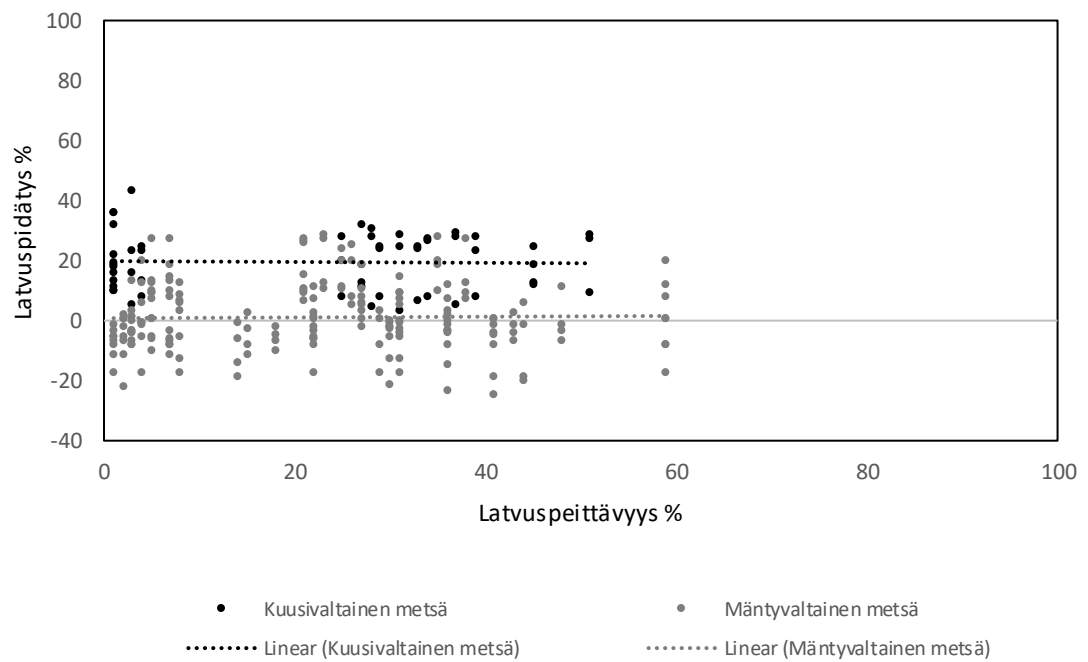
Pulkkila. Latvuspeittävyden vaikutus latvuspidätykseen



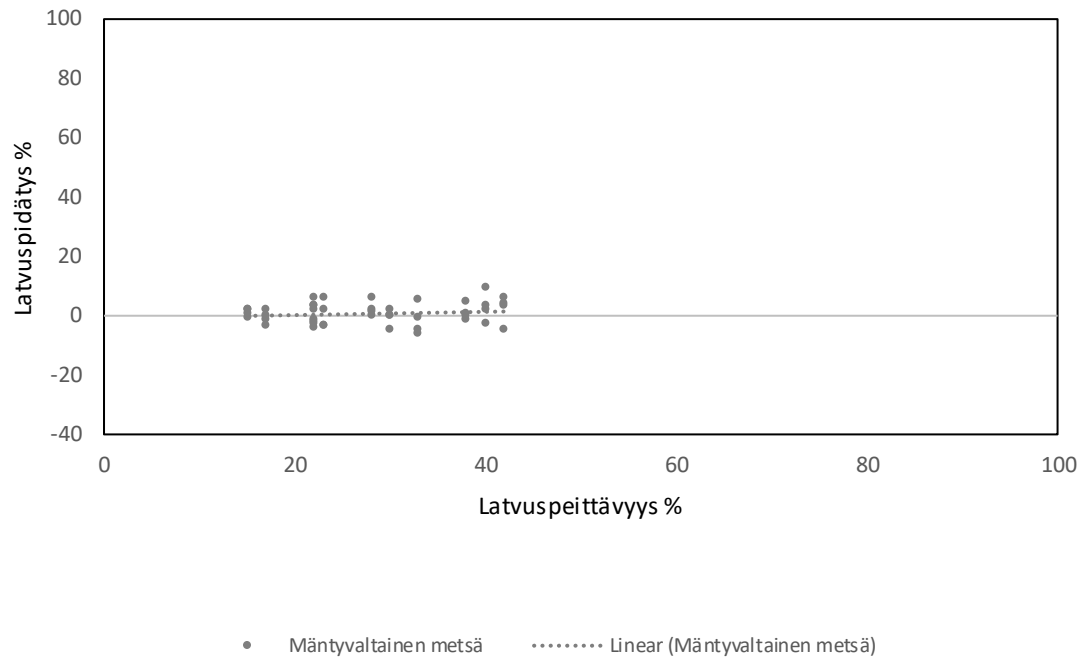
Pudasjärvi. Latvuspeittävyden vaikutus latvuspidätykseen



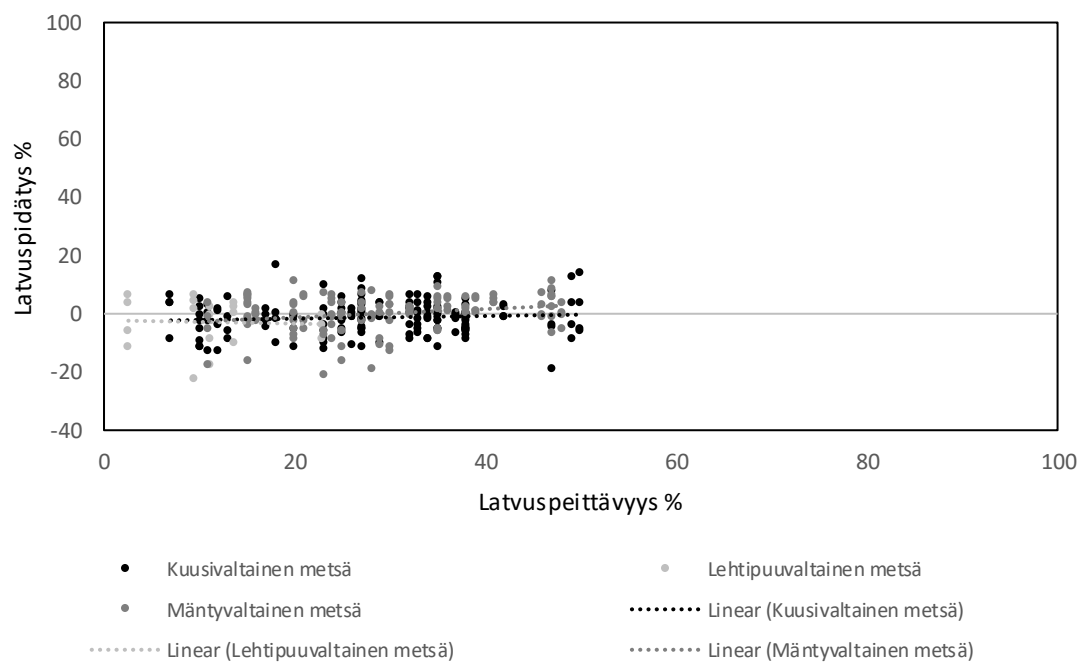
Taivalkoski. Latvuspeittävyden vaikutus latvuspidätykseen



Salla. Latvuspeittävyden vaikutus latvuspidätykseen



Sodankylä. Latvuspeittävyden vaikutus latvuspidätykseen



Kittilä. Latvuspeittävyys vaikutus latvuspidätykseen

